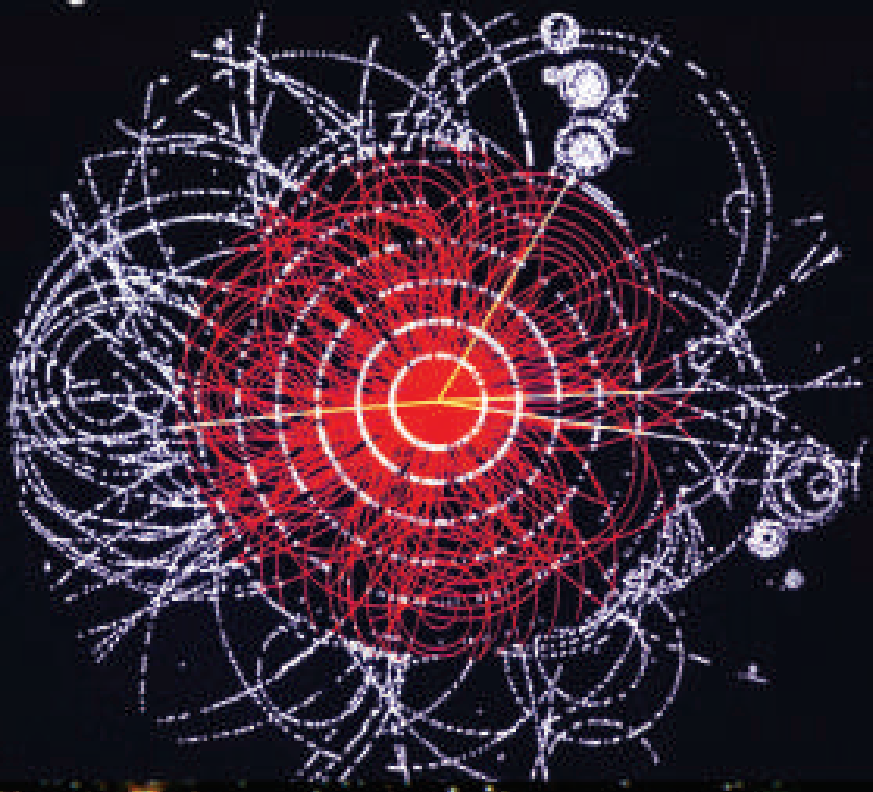
Nhóm chủ biên:
Cao Chi - Chu Hảo - Pierre Darriulat
Nguyễn Xuân Xanh - Phạm Xuân Yêm

HẠT HIGGS



và MÔ HÌNH CHUẨN

CUỘC PHIÊU LƯU KÌ THÚ CỦA KHOA HỌC

NHÀ XUẤT BẢN TRI THỨC

Thế kỉ thứ 5 trước Công nguyên, các nhà triết học tự nhiên Hi Lạp Leucippus và Democritus đã đưa ra lí thuyết nguyên tử nói rằng mọi vật trên đời được cấu tạo bằng những hạt nhỏ cơ bản không chia cắt được, gọi là nguyên tử, nằm trong chân không. Nguyên tử được xác nhận cuối thế kỉ 19, đầu 20, nhưng không phải là hạt cơ bản. Các thành phần khác nhỏ hơn của nguyên tử cũng lần lượt tìm thấy như electron, proton và neutron. Cuộc tìm kiếm hạt cơ bản của vật chất, và các chất keo giữ chúng, trải qua muôn vàn khó khăn, nhưng kết thúc đẹp vào các thập niên của nửa sau thế kỉ 20. Các kết quả được đúc kết lại trong cái gọi là Mô hình Chuẩn. Nguyên tử không còn là hạt cơ bản, mà là hỗn hợp của những hạt cơ bản có tên *quark*. Mô hình Chuẩn chứa đựng danh sách các hạt cơ bản, gồm hạt vật chất và hạt truyền lực, và mô tả sự tương tác của chúng một cách chính xác kì diệu.

HẠT HIGGS và MÔ HÌNH CHUẨN

Với sự cộng tác của:

Cao Chi (Hà Nội), Ngô Bảo Châu (Chicago), Đàm Thanh Sơn (Chicago), Thân Đức Hiền (Hà Nội), Nguyễn Tiến Bình (Texas), Phạm Việt Hưng (Úc), Nguyễn Đức Tường (Canada), Cao Huy Thuần (Paris), Trương Văn Tân (Úc), Nguyễn Văn Trọng (TP. HCM), Nguyễn Đức Hiệp (Úc), Pierre Darriulat (Hà Nội), Nguyễn Xuân Xanh (TP. HCM), Phạm Xuân Yêm (Paris).

Với đóng góp bài vở của:

Steven Weinberg, François de Rose, Carlo Rubbia, Bob Eisenstein, Nicolas Koulberg, Robert Cailliau, John Iliopoulos, Marzio Nessi, Hafeez Hoorani, Egil Lillestøl, Lyn Evans, Anders Unnervik, Tejinder Virdee, Daniel Froidevaux, Paris Sphicas, John Harvey, Pere Mato, Les Robertson, Philip Bryant, Michel Della Negra, Peter Jenni và Tejinder S. Virdee

Với đóng góp dịch thuật và biên tập của:

Phạm Văn Thiều, Phạm Ngọc Điệp, Nguyễn Đức Phường, Phạm Thị Tuyết Nhung, Nguyễn Hồng Vân, Nguyễn Công Kiên, Đỗ Hoàng Sơn, Lion Alio, Trần Hương Lan, Vũ Anh Tuấn, Phạm Ngọc Đồng, Nguyễn Thị Thảo, Nguyễn Văn Hiệp.

Bản quyền tiếng Việt © Nhà xuất bản Tri thức và các tác giả.

Kỉ yếu Hạt Higgs là tập hợp những bài viết của các cá nhân tự nguyện, và chỉ phản ánh quan điểm riêng của tác giả. Và tác giả chịu trách nhiệm về nội dung bài viết của mình.

Mọi sự phổ biến, đăng lại nguyên bài từ Kỉ yếu trên các phương tiện truyền thông đều cần có sự đồng ý của tác giả và nhà xuất bản. Các trích dẫn cần nhắc đến Kỉ yếu với tên chính thức như trên bìa, Nhóm chủ biên, nhà xuất bản và năm.

Tủ sách Kỉ yếu của Nxb Tri thức đã xuất bản:

Trong Ngần Bóng Gương. Mừng GS. Đặng Đình Áng thượng thọ 80, 2006.

Sĩ Phu Thời Nay. Mừng GS. Hoàng Tụy thượng thọ 80, 2007.

Max Planck - Người Khai Sáng Thuyết Lượng Tử. Mừng sinh nhật thứ 150, 2008.

400 Năm Thiên Văn Học và Galileo Galilei, 2009.

150 Năm Thuyết Tiến Hóa và Charles Darwin, 2009.

Đại học Humboldt 200 Năm (1810-2010). Kinh Nghiệm Thế Giới và Việt Nam, 2010.

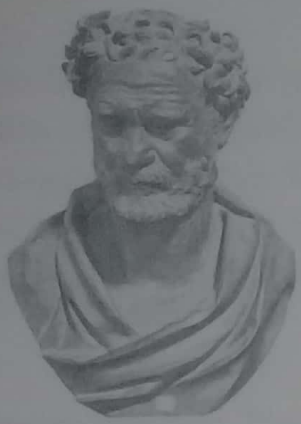
HẠT HIGGS và MÔ HÌNH CHUẨN

CUỘC PHIÊU LƯU KÌ THÚ CỦA KHOA HỌC

Nhóm chủ biên:

Cao Chi - Chu Hảo - Pierre Darriulat
Nguyễn Xuân Xanh - Phạm Xuân Yêm

NHÀ XUẤT BẢN TRI THỨC



"Không có gì tồn tại ngoài các nguyên tử và không gian rỗng; tất cả những thứ khác như màu sắc, vị ngọt, đắng của sự vật đều có tính biểu kiến."

DEMOCRITUS (thế kỉ 5 trước CN)

"Bây giờ tôi sẽ tung vào gió khái niệm về các vật thể rắn và khối lượng."

LAMA DROMTONPA (thế kỉ 11)

"Do đó có những tác nhân trong Tự nhiên có khả năng làm cho những Hạt của các vật thể bám vào nhau bởi những Hấp lực rất mạnh. Và Nhiệm vụ của Triết học thực nghiệm là phải tìm ra chúng."

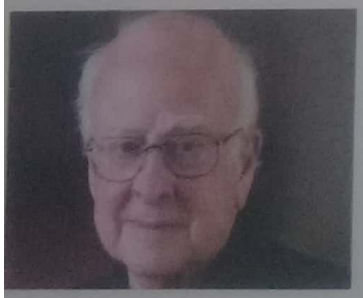
ISAAC NEWTON (thế kỉ 17)

"Vật chất, dù chia được rất nhỏ, nhưng không phải vô tận. Nghĩa là có một điểm dừng mà vượt quá nó chúng ta không thể chia tiếp được... Tôi đã chọn từ "nguyên tử" để gọi tên những hạt cuối cùng này."

JOHN DALTON (thế kỉ 19)

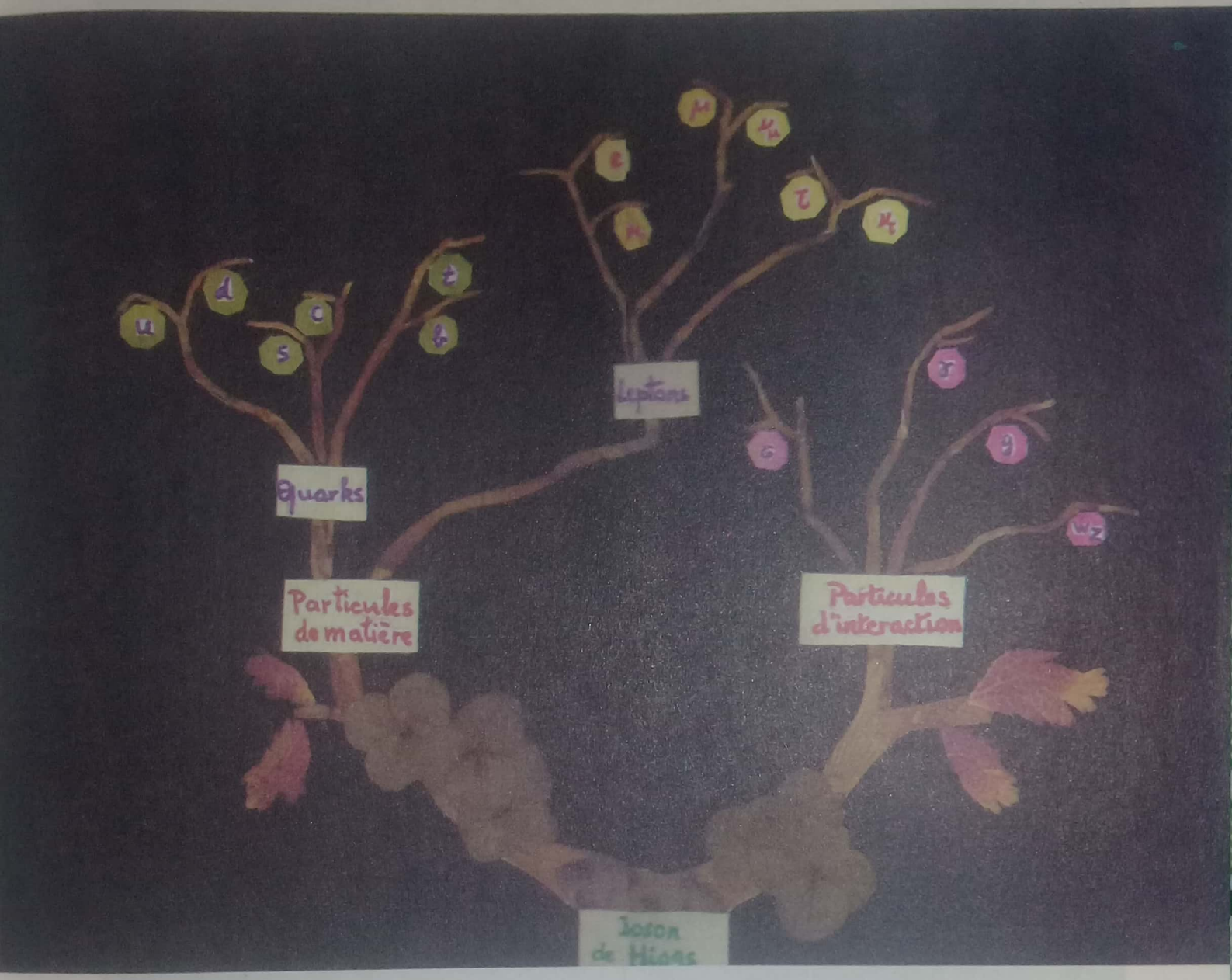
"Tôi yêu cầu quý vị hãy nhìn theo hai cách. Bởi vì con đường đưa tới tri thức về các vì sao đi ngang qua nguyên tử; và tri thức quan trọng về nguyên tử đã được đạt tới bằng các vì sao."

ARTHUR EDDINGTON (thế kỉ 20)



"Nếu hạt boson này không có, thì chúng ta cũng sẽ không có mặt ở đây."

PETER HIGGS (thế kỉ 20/21)



Ảnh minh họa Mô hình Chuẩn bằng hoa và giấy của Nguyễn Hữu Khánh, nhà vật lí hạt thực nghiệm đã làm việc nhiều năm ở CERN, DESY, SLAC. Thân cây là hạt boson Higgs. Nhánh phải là các hạt tải lực, bên trái là các hạt vật chất gồm các quark và lepton.

CA NGỢI LÍ TÍNH *và* KHOA HỌC

Những ý tưởng chín muồi từ từ, rồi thình lình bùng lên thành ánh sáng của ngày. Các lí thuyết cho đến nay bị hạn chế vào duy nhất giới tinh hoa trí thức đã trở thành tài sản của nhiều người. Những khái niệm trước đây người ta hầu như không dám đưa ra nay mạnh dạn tiến lên phía trước, và thách thức thế giới một cách tự do.

Nhưng những con người này (người phê phán) sẽ làm được nhiều điều hơn là những gì họ phá hủy; họ sẽ xây dựng nên cái mới. Ánh sáng của lí tính, họ tuyên bố, sẽ xua tan những bóng tối che lấp địa cầu. Họ sẽ phát hiện lại bản đồ của Tự nhiên. Một khi họ đã làm điều đó, tất cả những gì họ cần làm là sống phù hợp với nó, và bằng cách đó tái lập quyền từ lúc sinh ra đã mất từ lâu, là hạnh phúc.

Lí tính như một tia sáng thần thánh, một hạt giống của chân lí được ban cho con người, nó sẽ phát triển đến thời điểm mà, sau khi kinh qua các cánh cửa của vô minh, con người sẽ có thể nhìn Chúa, mặt đối mặt.

Nó phát triển đến mức độ khổng lồ. Đầu nó chạm đến trời, chân nó xuống tới vực thẳm, đôi tay dang ra duỗi từ cực này sang cực kia. Trong tay phải, nó vung lên ngọn đuốc mà những tia sáng lập loè thắp sáng lên vùng nước mênh mông và xuyên đến tận lòng Trái Đất. Tên của nó là thí nghiệm.

Lí tính là độc lập. Bất cứ ai có được lí tính và sử dụng nó đúng, sẽ không bao giờ lạc lối. Lí tính bước lên đường vững chắc tới chân lí. Lí tính không cần quyền uy, quyền uy là nguồn gốc của sai lạc. Lí tính không ngại truyền thống; nó cũng không ngại trường phái cổ đại hay hiện đại. Tất cả mọi sai lạc đều bắt nguồn từ tin tưởng mù quáng, không xem xét các sự việc dưới ánh sáng của lí tính.

Từ dân tộc văn minh nhất của thế giới, đến những người da đỏ Hu-rông của Hồ Michigan, những người Hốt-tan-tô khốn khổ nhất (ở Nam Phi), mối nối cuối cùng của con người và thú, ở Bắc, Nam, Đông và Tây, Tự nhiên đều nói bằng một thứ tiếng, tiếng nói của lí tính.

Lí tính sẽ khai sáng mọi con người khi bước vào thế giới, bởi vì lí tính chính là ánh sáng.

Trong thời ánh sáng, tầm mắt của họ tuy có bị che khuất bởi những dãy băng, cha họ, những tổ tiên họ có thể bị mù, nhưng họ, họ sẽ là những Đứa con của Ánh sáng.

Những đứa con của Adam nhóm lửa và thời đại của ánh sáng bắt đầu, die Aufklärung.

Bầu trời của tự do, của độc lập trải ra trước mắt ta; ta chưa thể đạt đến đó, nhưng ta sẽ bền gan, bởi vì ta ở trên con đường đúng.

Paul Hazard, *European Thought in the Eighteenth Century.*

Nguyễn Xuân Xanh chọn lọc và dịch

LỜI CẢM ƠN
NHỮNG ĐÓNG GÓP

Để Kỉ yếu Hạt Higgs hình thành, chúng tôi cần đến nhiều bàn tay góp sức. Về mặt đóng góp nội dung, chúng tôi cảm ơn GS. Pierre Darriulat, Hà Nội, người bạn thân thiết của khoa học Việt Nam, người đã từng 'thủ' một cổ máy dò vào đầu những năm 1980 tại CERN trong việc tìm các hạt boson W, Z là các hạt truyền lực yếu. GS. Pierre Darriulat đã công phu soạn và sắp đặt các chương 2, 3, 4. Chúng tôi, đặc biệt, biết ơn sâu sắc đến quý vị GS. Lyn Evans, Daniel Froidevaux, Peter Jenni, Philippe Lebrun, Christine Sutton, Tejinder Virdee và Horst Wenninger.

Việc dịch từ bản gốc tiếng Anh sang tiếng Việt là một nỗ lực lớn đã được thực hiện bởi các bạn Phạm Ngọc Điệp và Phạm Thị Tuyết Nhung, chúng tôi chân thành cảm ơn họ. Đội ngũ dịch giả bao gồm các bạn Nguyễn Hồng Vân, Nguyễn Công Kiên, Đỗ Hoàng Sơn, Lion Alio, Trần Hương Lan, Vũ Anh Tuấn, Phạm Ngọc Đồng, Nguyễn Thị Thảo, Nguyễn Văn Hiệp, Phạm Ngọc Điệp và Phạm Thị Tuyết Nhung. Chúng tôi bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc nhất đến sự giúp đỡ của họ.

Những hồi ức được biên soạn trong Chương 2 được mượn từ trang web của CERN http://public.web.cern.ch/public/en/people. Bài viết Nghiên cứu lý thuyết tại CERN là kết luận trong một chương của cuốn *Lịch sử của CERN* (1996, vol.3, pp.277-326, biên tập bởi John Krige, Elsevier) do John Iliopoulos viết. Các bài viết được sao chép tại Chương 3 đã được xuất bản trong *Science*, vol. xx (2012) trang xx-xx. Chương 4 mượn hầu hết các bài viết từ cuốn sách tuyệt vời *Gia tốc đối chùm hadron LHC: Một cuộc phiêu lưu kì thú của công nghệ* do Lyn Evans biên tập (2009, CERN và EPFL Press). Phần đầu của bài viết, Tổng quan về Máy gia tốc đối chùm LHC, sử dụng những trích đoạn từ bài báo xuất bản bởi Philippe Lebrun trong "Kỉ yếu Hội nghị châu Âu về Máy gia tốc Hạt lần thứ 9" (EPAC2004, Lucerne, 05-09 tháng 7 năm 2004, www.jacow.org) và phần thứ hai dựa trên "Báo cáo Thiết kế

LHC" (lhc.web.cern.ch / LHC / LHC-designreport.html). Phần giới thiệu về bài viết Ngày 24 tháng 9 năm 2008 được mượn từ một bài viết của Lucio Rossi, "Siêu dẫn: vai trò, sự thành công và thất bại của nó trong LHC tại CERN" (Supercond. Sci. Technol., 23 (2010) 034.001). Bài viết "Câu chuyện sinh động về sản phẩm phụ hữu ích" của Philip Bryant được lấy từ *CERN Courier*, số tháng 5 năm 2011 và bài "Những kinh nghiệm từ quá trình xây dựng" bởi Daniel Froidevaux và Paris Sphicas là một đóng góp nguyên bản của các tác giả cho cuốn sách.

Đối với tất cả những bài viết này, gồm cả những hình ảnh đi kèm, chúng tôi bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc nhất đến những tác giả và nhà xuất bản đã cho phép chúng tôi dịch sang tiếng Việt và giữ bản quyền bản tiếng Việt.

Cảm ơn GS. Phạm Xuân Yêm, Paris, một trong những chuyên gia hàng đầu của Việt Nam về vật lý hạt. GS. Cao Chi, và GS. Chu Hảo, Hà Nội, những người ủng hộ Kỉ yếu ngay từ đầu với nhiều ý kiến đóng góp quý báu. Cảm ơn TS. Nguyễn Trọng Hiền, Caltech. Các bạn Phạm Ngọc Điệp và nhóm đồng nghiệp của anh, bạn Nguyễn Đức Phường, Hà Nội, lần lượt trong việc dịch thuật và biên tập, những công việc rất nặng nhọc. Cảm ơn các nhà nghiên cứu đã tham gia bài vở, GS. Cao Chi (Hà Nội), GS. Đàm Thanh Sơn (Chicago), GS. Thân Đức Hiền (Hà Nội), TS. Nguyễn Tiến Bình (Texas), TS. Phạm Việt Hưng (Úc), GS. Nguyễn Đức Tường (Canada), TS. Phạm Văn Thiều (Hà Nội), người chuyển ngữ bài của Steven Weinberg; Phần nhân văn, các GS. Cao Huy Thuần (Paris), TS. Trương Văn Tân (Úc), GS. Nguyễn Văn Trọng (TP. HCM), GS. Nguyễn Đức Hiệp (Úc) và GS. Pierre Darriulat (Hà Nội).

Chúng tôi cảm ơn sự kiên nhẫn của tất cả các thành viên đóng góp bài vở sớm mà vẫn chờ đợi cho đến khi số Kỉ yếu ra đời.

Cảm ơn Nhà xuất bản Tri thức tổ chức và thực hiện công việc xuất bản.

Thay mặt *Nhóm chủ biên*
Nguyễn Xuân Xanh

TRI ÂN

CÁC MẠNH THƯỜNG QUÂN

Kỉ yếu luôn luôn cần đến những tấm lòng hảo tâm của các Mạnh Thường Quân để ra mắt và đến tay độc giả. Đối với số Kỉ yếu Hạt Higgs này, chúng tôi xin tri ân sâu sắc sự đóng góp tài chính quý báu của các cá nhân và tổ chức sau đây:

TS. Bùi Trân Phượng (Đại học Hoa Sen)
TS. Mai Ninh
GS. Trần Thanh Vân
TS. Trương Văn Tân
GS. (giấu tên)
GS. (giấu tên)
GS. Nguyễn Minh Thọ
GS. Bác sĩ Phạm Duy Thoại
TSKH. Trần Hà Anh
GS. Nguyễn Đức Tường
TS. Đặng Đình Thi
Trần Tuấn Dũng
Nhà giáo Phạm Thảo Nguyên
Ủy Ban về Người Việt Nam ở Nước Ngoài - TP. Hồ Chí Minh
Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh

Chính các nhà hảo tâm trên đã cho Kỉ yếu khối lượng, giống như hạt Higgs đã tạo khối lượng cho vật chất. Chúng tôi xin tri ân sâu sắc.

Thay mặt *Nhóm chủ biên*
Nguyễn Xuân Xanh

MỤC LỤC

Đôi lời mở đầu i
GS Giải Fields Ngô Bảo Châu

Lời giới thiệu iii
Nhóm chủ biên

Lời phi lộ vii
Nguyễn Xuân Xanh và Phạm Xuân Yêm

CHƯƠNG 1. MÔ HÌNH CHUẨN VÀ HẠT HIGGS

Mô hình Chuẩn của vật lí hạt cơ bản 3
Phạm Xuân Yêm

Nhóm tái chuẩn hoá: Một cuộc cách mạng về nhận thức 67
Đàm Thanh Sơn

Hạt Higgs và Chúng ta 73
Nguyễn Xuân Xanh

Vật lí: Những gì chúng ta biết và chưa biết 197
Steven Weinberg

Siêu dẫn 209
Thân Đức Hiền

Boson Higgs và lí thuyết lạm phát của vũ trụ 227
Nguyễn Tiến Bình

Tiếp sau Higgs là bài toán ED? 249
Cao Chi

Câu chuyện "hạt của Chúa" đã kết thúc? 265
Phạm Việt Hưng

Richard Feynman và Vật lí đương đại 283
Nguyễn Đức Tường

Murray Gell-Mann 299
Nguyễn Xuân Xanh

Enrico Fermi 305
Nguyễn Xuân Xanh

Hideki Yukawa 309
Nguyễn Xuân Xanh

CHƯƠNG 2. CERN: CUỘC PHIÊU LƯU KÌ THÚ CỦA HỢP TÁC KHOA HỌC QUỐC TẾ

Máy gia tốc liên hợp 321
Pierre Darriulat

Mục đích cao cả 325
François de Rose

Một cuộc phiêu lưu kì diệu 329
Carlo Rubbia

Xây dựng những cầu nối 333
Robert Eisenstein

Các đối tác thực thụ và bình đẳng 335
Nicolas Koulberg

Mảnh đất màu mỡ 337
Robert Cailliau

Trung tâm Lí thuyết ở CERN 339
John Iliopoulos

Con tàu trong chai 343
Marzio Nessi

Pakistan và CERN 345
Hafeez Hoorani

CERN: một trải nghiệm độc nhất vô nhị 347
Egil Lillestøl

CHƯƠNG 3. HÀNH TRÌNH TÌM KIẾM BOSON HIGGS

Hành trình tìm kiếm hạt boson Higgs: Thí nghiệm ATLAS và CMS tại Máy gia tốc đối chùm hadron 355
M. Della Negra (CMS), P. Jenni (ATLAS) và T.S. Virdee (CMS)

CHƯƠNG 4. MÁY GIA TỐC ĐỐI CHÙM VÀ CÁC HỆ ĐO

Tổng quan về máy gia tốc đối chùm LHC 385
(Dựa trên bài viết của Phillippe Lebrun và Báo cáo thiết kế LHC)

Phê duyệt đề án 401
Lyn Evans

Ngân sách, chi phí và mua sắm 405
Anders Unnervik

Ngày 24 tháng 9 năm 2008 409
Lyn Evans

Ghi nhận hạt tại LHC: Lời giới thiệu 413
Tejinder Virdee

Những kinh nghiệm từ quá trình xây dựng 429
Daniel Froidevaux và Paris Sphicas

Phân tích số liệu LHC và GRID 443
John Harvey, Pere Mato và Les Robertson

Câu chuyện sinh động về sản phẩm phụ hữu ích 455
Philip Bryant

CHƯƠNG 5. HÀNH TRÌNH KHÁM PHÁ HIGGS VÀ KHOA HỌC VIỆT NAM

Phản biện để phát triển 463
Pierre Darriulat

Khoa học công nghệ và "sĩ, nông, công, thương" thời hiện đại 469
Trương Văn Tân

Khi văn chương vinh danh khoa học 479
Cao Huy Thuần

Khoa học và văn hóa 497
Nguyễn Văn Trọng

Đạo đức trong sự vận hành của hệ thống nghiên cứu khoa học 503
Nguyễn Đức Hiệp

ĐÔI LỜI MỞ ĐẦU

Vì hiểu biết của tôi về Vật lí lí thuyết không sâu sắc hơn của những người được coi là quần chúng được khai sáng, tôi thấy mình không đủ khả năng để tổng kết nội dung những bài viết trong quyển sách này. Tôi cũng không muốn viết lại những thông tin chung chung mà bạn đọc có thể tìm thấy ở khắp nơi. Trót nhận lời với Giáo sư Darriulat viết Lời mở đầu cho quyển sách này, tôi xin phép kể một câu chuyện có tính cá nhân: tôi đã gặp ý tưởng của ông Higgs như thế nào, và cuộc gặp ấy đã ảnh hưởng đến công việc nghiên cứu của tôi ra sao.

Luận án Tiến sĩ của tôi bảo vệ năm 1997 chứa mầm mống của ý tưởng mà sau này là chìa khoá để giải quyết bài toán "bổ đề cơ bản" của Langlands. Cái tôi thiếu là một mô hình hình học cho các tích phân quỹ đạo, nhân vật chính của bổ đề cơ bản. Một số mô hình hình học đã được đưa ra từ trước đó, nhưng cái tôi cần là một mô hình rộng hơn, mềm dẻo hơn, để cho cái ý tưởng còn đang ở dạng mầm mống kia có chỗ triển khai, một da thịt đủ màu mỡ để cho nó "đầu thai".

Vào thời gian cuối những năm 1990, lí thuyết Langlands hình học của hai nhà toán học gốc Xô viết Beilinson và Drinfeld đang là tâm điểm chú ý của thế giới toán học. Tôi để ý thấy trong phần tài liệu tham khảo của các bài viết về Langlands hình học, luôn xuất hiện một bài báo của Hitchin có tên "Diện Riemann và hệ hoàn toàn khả tích". Tò mò tìm đọc bài báo của Hitchin, tôi lờ mờ hiểu ra rằng điểm xuất phát của Hitchin là phương trình vi phân mô tả một hạt cơ bản gọi là hạt Higgs. Phương trình này có bốn

chiều, nhưng để cho đơn giản, Hitchin rút số chiều xuống thành hai. Khi số chiều còn hai, hệ phương trình có tính chất bảo giác, và vì thế nó không chỉ có ý nghĩa trên mặt phẳng thực, mà còn có thể phát biểu cho mọi diện Riemann. Hitchin phát hiện ra rằng không gian nghiệm là một hệ hoàn toàn khả tích rất đẹp đẽ. Nó có lẽ là một hệ hoàn toàn khả tích tổng quát nhất mà chúng ta biết.

Bài báo của Hitchin đọc rất dễ hiểu. Tôi đọc rất thích thú tuy không hiểu có thể dùng nó vào việc gì trong nghiên cứu của mình. Mấy năm sau tôi đọc lại và vẫn có cảm giác giống như thế. Đến năm 2003 tôi đọc lại lần thứ ba và lần này tôi hiểu ra rằng hệ khả tích mà Hitchin mô tả chính là mô hình hình học mà tôi đã đi tìm bao nhiêu năm.

Thí nghiệm gần đây của CERN khẳng định phán đoán của Englert và Higgs về cơ chế chế tạo khối lượng cho các hạt cơ bản trong Mô hình Chuẩn thực sự là một khải hoàn ca cho trí tuệ con người. Người ta không thôi ngạc nhiên bởi cái mà Wigner gọi là "unreasonable effectiveness" của toán học trong khoa học tự nhiên: những phương trình của Higgs chính là chìa khoá để khám phá một trong những bí mật mà các hạt cơ bản đã chôn sâu nhất. Đối với tôi, việc chính những phương trình này lại là chìa khoá để giải mã một trong những bài toán rất khó của lí thuyết số, là một điều vô cùng kì diệu.

Chắc hẳn bạn đọc sẽ có một hành trình thú vị cùng quyển sách này đi ngược thời gian về thời điểm khám phá ra hạt Higgs. Cảm ơn ban biên tập và các tác giả đã cho chúng ta con tàu để đi ngược thời gian.

GS Giải Fields Ngô Bảo Châu

LỜI GIỚI THIỆU

Vào ngày 4 tháng 7 năm 2012, Trung tâm Nghiên cứu Hạt nhân Âu châu (CERN) đã công bố rộng rãi trên các phương tiện thông tin đại chúng khám phá về một loại hạt cơ bản mới. CERN là trung tâm nghiên cứu sở hữu hệ thống máy gia tốc hạt có năng lượng và kích thước lớn nhất thế giới. Tầm quan trọng của khám phá này được thể hiện ở hai điểm: thứ nhất, hạt cơ bản mới này chính là liên kết chủ yếu còn thiếu trong bức tranh thế giới hạ nguyên tử (gọi là Mô hình Chuẩn) được vẽ từ 35 năm trước, vào những năm 1970; thứ hai, việc khám phá ra loại hạt này là phần thưởng xứng đáng cho ba mươi năm lao động vất vả và tận tụy của hàng ngàn nhà khoa học, nhà vật lí, kĩ sư và kĩ thuật viên.

Tìm kiếm boson Higgs - loại hạt đã được tìm kiếm từ lâu - là một cuộc phiêu lưu kì thú của khoa học đương đại. Vẻ đẹp và sự tao nhã của Mô hình Chuẩn, sự tinh vi và phức tạp đáng kinh ngạc của những công cụ làm nên khám phá khiến người ta phải ngưỡng mộ. Câu chuyện này là một ví dụ tuyệt vời cho thế hệ trẻ Việt Nam về sự quyết tâm, tinh thần sáng tạo, tinh thần hợp tác mà cộng đồng các nhà khoa học quốc tế đã cống hiến cho khoa học và tri thức. Đó cũng là một ví dụ về sự nghiêm túc tri thức và đạo đức, tất cả các phẩm chất cần thiết cho sự phát triển của khoa học.

Vật lí hạt là một trong những ngành tiên phong nhất của khoa học. Có thể kể ra một vài ngành tương tự như vật lí thiên văn, di truyền học và thần kinh học. Phương pháp nghiên cứu của chúng có thể khác nhau, ví dụ phương pháp của vật lí hạt và vật lí thiên văn đòi hỏi việc sử dụng các thiết bị rất lớn và tốn kém - gọi là "khoa học lớn"- nhưng chúng đều đòi hỏi ở các nhà khoa học những phẩm chất mà chúng ta vừa nêu ở trên. Thành

công của họ chỉ ra con đường cho khoa học Việt Nam, nền khoa học đang phục hồi sau nhiều năm chiến tranh và khó khăn. Sự hồi sinh và tương lai của nó nằm trong tay thế hệ trẻ. Chúng tôi hi vọng những bài học rút ra từ câu chuyện về boson Higgs sẽ thúc đẩy tham vọng và nhiệt tình của các bạn trẻ với khoa học và tri thức.

Để kể lại câu chuyện, chúng tôi nghĩ rằng cách tốt nhất là chọn một số bài báo được viết bởi chính những nhân vật trực tiếp tham gia vào cuộc phiêu lưu kì thú này, và kết nối chúng với nhau bằng vài lời giới thiệu ngắn gọn.

Chương đầu tiên trình bày về Mô hình Chuẩn được xây dựng trên những bất biến cơ bản - đối xứng nhóm và bất biến gauge - và đòi hỏi sự xuất hiện của một loại hạt mới để giải thích cho thực tế rằng nhiều hạt cơ bản có khối lượng. Tên của hạt mới này được đặt theo tên của nhà vật lí Peter Higgs, người đã có công đưa hạt này vào lí thuyết. Tuy nhiên, không phải chỉ có mình Peter Higgs khám phá. Lịch sử hình thành Mô hình Chuẩn, đặc biệt là cơ chế phát sinh khối lượng dựa trên cơ chế phá vỡ đối xứng tự phát, là một chương hấp dẫn của lịch sử khoa học hiện đại. Việc phát hiện ra hạt Higgs mặc dù đã gần như chắc chắn nhưng vẫn cần được chứng minh thêm, sẽ khép lại chương này của vật lí hạt. Tuy nhiên, trong vật lí vẫn còn nhiều câu hỏi mở, đặc biệt ở ranh giới giữa vật lí hạt và hấp dẫn, nên các nhà vật lí phải bận rộn trong một thời gian dài.

Chương thứ hai trình bày về CERN, nơi khám phá này được thực hiện. CERN, biểu tượng của thành công trong hợp tác quốc tế, thường được cho là nơi duy nhất có thể thực hiện được một khám phá như vậy. Điều này có thể hơi phóng đại một chút nhưng cũng cho thấy sự tôn trọng và ngưỡng mộ của cộng đồng các nhà vật lí hạt đối với CERN. Qua hồi ức của một vài người trong số họ, chúng ta sẽ thấy rõ điều đó.

Chương thứ ba tổng hợp lại các câu chuyện về Higgs, được viết bởi các phát ngôn viên đầu tiên của các thí nghiệm đã phát hiện ra nó, ATLAS và CMS. Đây là một tài liệu tổng hợp đáng chú ý, được dịch nguyên vẹn với sự cho phép của các tác giả.

Chương thứ tư chọn lọc một số tài liệu liên quan đến việc thiết kế, xây dựng, lắp đặt và vận hành các thiết bị được sử dụng trong khám phá: LHC

(máy gia tốc hạt siêu dẫn, nằm trong một đường hầm tròn chu vi 27 km) và hai hệ đo ATLAS và CMS.

Chương thứ năm, cũng là chương cuối cùng, chọn lọc một số bài viết về mối quan hệ giữa khoa học và nhân văn.

Chúng tôi bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến tất cả những người đã giúp chúng tôi biên soạn cuốn sách này. Sự đóng góp chi tiết của họ được nói lên ở phần Lời cảm ơn của cuốn sách.

Nhóm chủ biên

LỜI PHI LỘ

Quý độc giả kính mến,

Các quốc gia phát triển và nhiều quốc gia khác trên thế giới hiện nay đều có những hạt Higgs của họ cho độc giả đại chúng. Nay chúng ta cũng có một hạt Higgs cho độc giả Việt Nam.

Quyển sách Kỉ yếu Hạt Higgs mà quý độc giả cầm trên tay là kết quả của những nỗ lực của các nhà khoa học sống ở Việt Nam cũng như ở hải ngoại. Nếu tính từ ngày chúng tôi gửi lời kêu gọi tham gia vào đầu tháng 8 năm 2012 cho đến nay đã một năm rưỡi trôi qua, một thời gian dài "kỉ lục" trong các kỉ yếu. Dài nhất có lẽ là thời gian của Kỉ yếu Đại học Humboldt - một năm. Quả là hạt Higgs "khó tìm", trong thực nghiệm, cũng như trong dạng một Kỉ yếu, vì nó không dễ nắm bắt. Nhưng có sao đâu. Thế giới đã chờ 48 năm để tìm hạt boson Higgs thì chúng ta chờ thêm nửa năm nữa có đáng gì. Vả lại, vô tình Giải Nobel 2013 đã "hâm nóng" đề tài hạt Higgs của Kỉ yếu, làm cho nó trở nên "hấp dẫn" gấp bội.

Cơ chế Higgs và Mô hình Chuẩn, lí thuyết của các hạt cơ bản tạo ra khối lượng thấy được của vũ trụ, là cuộc hành trình kì thú của thế kỉ 20, của các nhà vật lí lí thuyết và thực nghiệm. Không ai ngờ cơ chế Higgs để tạo khối lượng, mô hình Quark, sự thống nhất hai lực điện từ và lực yếu, lực mạnh điều khiển và giam các quark, những viên gạch nhỏ nhất mà loài người đi tìm từ thời cổ đại, đã xuất hiện bất ngờ như những mảnh zig zag liên kết thống nhất với nhau trong một bức tranh vô cùng thú vị của tạo hóa. Cơ chế Higgs và gắn liền với nó là sự phá vỡ đối xứng của thuyết điện-yếu thống nhất là "chứng tích" của sự tiến hóa của vũ trụ, đúng như kịch bản Big Bang đề ra.

Sự khám phá hạt Higgs là một xác nhận trọn vẹn Mô hình Chuẩn, giải thích sự vận hành và tương tác của các hạt cơ bản tạo ra vũ trụ này, trong đó có chúng ta, có hành tinh xanh yêu dấu của chúng ta, có dải Ngân hà kì vĩ. Không có hạt Higgs, không có nguyên tử, không có hành tinh, và không có chúng ta. Ngày 4 tháng 7 năm 2012 do đó là "ngày vĩ đại" của vật lí hạt, và của trí tuệ nhân loại.

Thượng Đế tinh tế nhưng không "thâm hiểm" như Einstein nói ư? Chính ông cụ đi tìm mãi bản đồ tạo hóa mà không thấy, nên bực bội nói thêm: Có thể Thượng Đế "thâm hiểm" lắm. Và nhìn vào cấu trúc của các hạt, với những tính chất lượng tử nhiều lớp không ngờ của chúng, với những lực chi phối và kết chúng lại trong lòng các nguyên tử cũng rất ư lạ thường, có người cũng đi đến suy nghĩ, "Trời cao có thể thâm hiểm lắm", ông không dễ tiết lộ một cách dễ dàng "cơ trời" tạo ra khối lượng của vật chất của chúng ta đâu. Con người "thơ ngây" và hời hợt, chờ đợi những cái quá dễ dàng. Thế giới và chúng ta được tạo ra dễ dàng hay sao? Nhưng rồi qua Mô hình Chuẩn và hạt Higgs con người đã bắt đúng mạch tư duy của Thượng Đế, "y chang" như đúc.

Vẻ đẹp của Mô hình Chuẩn và Cơ chế Higgs không trực quan gọn gàng như thuyết tương đối hay lượng tử. Có những cái cũng trực quan được, dễ hình dung, nhưng khi đi vào nhiều chi tiết thì tình hình phức tạp hơn. Ở đây chúng ta có "vẻ đẹp lạ" (strange beauty), như tiêu đề của một quyển sách, vì rất nhiều thứ lạ mắt (Dĩ nhiên thuyết thương đối hay lượng tử đều lạ mắt cả). Lạ và, xét về kĩ thuật, cũng phức tạp nữa. Ở tận cùng đáy sâu của chân lí, tạo vật không quá đơn giản. Vì thế nên nhà vật lí lí thuyết Sidney Coleman của Đại học Havard, học trò của Murray Gell-Mann, mới dám nói một cách "khiêu khích" rằng, một ngàn nhà triết học trong một ngàn năm cũng không khám phá được những gì mà cuộc cách mạng vật lí của thế kỉ 20 đã mang lại về nhận thức cho nhân loại. Tuy nhiên, mọi thứ đều có thể hiểu được: "Không phải Chúa biết, tôi biết, mà cuối học kì, các bạn cũng sẽ biết" như một trong những câu nói nổi tiếng của Sidney Coleman.

Mô hình Chuẩn và hạt Higgs thuộc khoa học cơ bản, trước mắt phục vụ việc tìm kiếm những nguyên lí tối hậu của vũ trụ, thỏa mãn sự tò mò vô

hạn của con người từ bao đời trong khoa học, chứ không ai nghĩ để làm một ngành công nghiệp "quarkonics" với các hạt cơ bản quark của vật chất, điều đã từng xảy ra với electron. Có thể có người nói nó "vô bổ" và "tốn kém". Tốn kém thì đúng. Nhưng "vô bổ" thì chưa chắc. Sau một buổi diễn thuyết nổi tiếng về hiện tượng điện của Faraday tại Royal Society, một vị dân biểu của Quốc hội Anh hỏi: "Công dụng của tất cả những thí nghiệm đẹp kia là gì?". Faraday trả lời một cách gián tiếp: "Công dụng của một đứa trẻ mới sinh ra là gì?". Đứa trẻ sau đó đã trở thành nền công nghiệp điện. Khi J.J. Thomson tìm được electron, điện tử, có người đã "chúc mừng" mỉa mai ông, rằng mong hạt đó sẽ "sống mãi". Rồi ngành kĩ nghệ electronics ra đời.

Trong thời đại Mô hình Chuẩn, world wide web là một sản phẩm phụ của CERN nhưng đã có trị giá thương mại nhiều trăm tỉ Đô la, nếu không nói hơn, so với đầu tư tìm hạt Higgs ở CERN vào khoảng 10 tỉ Đô la. Đâu ai biết được tương lai xa.

Nhân loại vẫn còn nhiều tham vọng phía trước, bởi tất cả các lực của vũ trụ chưa được thống nhất vào một mối. Chúng phải xuất phát từ một luật tổng thể nào thuở xưa khi thế giới còn nóng bỏng, ở đó tồn tại một "siêu đối xứng". Với sự phát hiện hạt Higgs, một chương mới của lịch sử vật lí mở ra mà người ta chưa thấy hết được tầm hệ quả. Các chương trình như *Grand unification* (Đại thống nhất), *Supersymmetry* (Siêu đối xứng) và *String theory* (Lí thuyết dây) với các chiều dư không-thời gian (space-time extradimension) là những dự tính còn ở phía trước. Mô hình Chuẩn có thể phục vụ như một "bàn đạp" hay "trạm trung chuyển", một "hệ quy chiếu" để con người tiến đến những "vì sao" xa hơn trong vũ trụ tri thức mênh mông.

Kể chuyện hạt Higgs "không phải chỉ có hạt Higgs". Mà phía sau là cả một lịch sử phát triển của vật lí hạt đầy kịch tính. Khi Peter Higgs được yêu cầu kể về công trình của ông cho người không chuyên nghiệp nghe, ông bối rối: "Điều đó khó, vì người ta phải trở về thời xa xôi của lịch sử vật lí cho đến tận những nền tảng (của nó)". Sau đó ông bắt đầu câu chuyện bằng Big Bang với những tên của các lực và của những nhà vật lí như những anh hùng với các chiến tích trong truyện cổ tích cho trẻ em.

Nội dung của Kỉ yếu gồm có các phần lí thuyết, lịch sử, cuộc tìm kiếm

bằng thực nghiệm quy mô, và phần nhân văn về mối quan hệ giữa khoa học và xã hội. Phần lịch sử cuộc tìm kiếm thực nghiệm hạt Higgs trong các chương 2-3 và 4 đi vào chi tiết với các cây bút chuyên gia quốc tế hàng đầu. Hiểu được phần nào công việc này, mới hiểu thêm cái vinh quang của cuộc tìm kiếm vô cùng công phu. Công trình này là cả một "kì quan" của trí tuệ.

Kỉ yếu đặc biệt vui mừng nhận được *Đôi lời mở đầu* của GS. Ngô Bảo Châu. Đây không phải là lời giới thiệu thông thường để tạo PR cho Kỉ yếu. Thực tế, GS. Ngô Bảo Châu đã tiết lộ sự áp dụng ý tưởng của Cơ chế Higgs để giải quyết Bổ đề toán học Langlands của anh. Đó là một khám phá vô cùng thú vị. Những lí thuyết của vật lí, khi thành công, có thể có những ảnh hưởng vào toán học. Và ngược lại, những lí thuyết toán học đi trước bỗng nhiên một ngày nào đó có ảnh hưởng vào vật lí như "đúc". Đó là một sự thật kì thú của lịch sử.

Chúng tôi hi vọng, quyển Kỉ yếu Hạt Higgs sẽ góp phần đánh thức sự tò mò, thúc đẩy không khí yêu thích khoa học, lí thuyết lẫn thực nghiệm hay áp dụng, đang rất cần cho cuộc đổi mới và xây dựng đất nước. Việt Nam phải làm "người trong cuộc" của nền khoa học thế giới, và giàu có, phát triển, hoặc làm "người ngoài cuộc" và nghèo khó, lạc hậu. Khoa học được xuất hiện từ một cấu trúc xã hội, như một loại cây ghép cành, và trở lại phục vụ xã hội đó một cách đích đáng.

Thành tựu khoa học là sự thể hiện của văn hoá. Phương Tây từ lâu là miền đất có đầy đủ những điều kiện chính trị, xã hội, kinh tế thuận lợi nhất để khoa học phát triển. Phương Tây đã bứt khỏi các nền văn hoá khác từ những thế kỉ 16, 17 nhờ sức mạnh của các khám phá khoa học, công nghệ. Nhưng các quốc gia khác cũng đang cải thiện mình và tham gia ngày càng hiệu quả vào sự phát triển khoa học của thế giới. Khoa học không còn là một "độc quyền". Châu Á, một châu lục đang vươn lên mạnh mẽ, đã có những đóng góp rất quan trọng cho sự hình thành của Mô hình Chuẩn, như Nhật Bản (với Yukawa, Tomonaga, Sakata, Nambu, Kobayashi, Maskawa), Ấn Độ, Pakistan (với Bose, Salam), Trung Quốc (với Yang, Lee, Wu, Ting), và Hàn Quốc (với Benjamin Lee). Lịch sử cho thấy, những dân tộc nào có óc tò mò cao, thường được đền đáp bằng sự phồn vinh xã hội.

Nhật Bản cũng đang tham vọng xây một máy gia tốc lớn để quy tụ tri thức nhân loại về châu Á.

Chương cuối của Kỉ yếu đề cập đến mối quan hệ giữa khoa học và xã hội với nhiều đóng góp rất thú vị. Xã hội Việt Nam chỉ mới có cột đỡ nhân văn, văn chương thi phú và tinh thần bất khuất chống ngoại xâm đến cùng, nhưng chưa có cột đỡ khoa học vững chắc để tạo nên sự phồn vinh, sức mạnh, và đổi mới văn hóa truyền thống đang thiếu chất sống. Người làm khoa học cảm thấy còn lạc lõng. Ở các xã hội phát triển, khoa học là nhân tố trung tâm thấm đẫm các định chế của xã hội, và đại học là những nơi làm ra khoa học, tri thức. Khoa học như các hồng huyết cầu lưu chuyển trong mạch máu để đem đến sự sống cho từng tế bào cơ thể, trực tiếp hay gián tiếp, luôn luôn được sinh ra bất tận. Xã hội nào thiếu khoa học thấm đẫm như thế, xã hội đó yếu ớt và dễ bị suy yếu. Các "cuộc chiến kinh tế" giờ đây là cuộc chiến của các khoa học, công nghệ. Các cuộc chiến tranh bằng súng đạn lại càng như thế. Xưa nay vẫn thế. Tương lai vẫn thế. Thế chiến thứ II lại càng chứng tỏ hơn bao giờ hết là một cuộc chiến tranh của khoa học và công nghệ ở cấp độ cao cấp nhất, tinh vi nhất. Và khoa học có những quy tắc đạo đức nhất định của nó đối với lương tâm mà nếu không được tuân thủ, khoa học chỉ là sự dối trá phá hoại hơn là có lợi cho xã hội, và là "một sự tàn rụi của tâm hồn", như Louis Pasteur từng nói.

Chúng tôi mong mỏi quý độc giả quảng bá cho câu chuyện lịch sử Mô hình Chuẩn, hạt Higgs và cuộc tìm kiếm nó, cũng như tìm kiếm các hạt cơ bản, trong tinh thần thông tin, giáo dục và truyền cảm hứng, là "tôn chỉ" của các số kỉ yếu, và xin đón nhận kỉ yếu với sự lượng thứ cho những thiếu sót tồn tại do lực bất tòng tâm.

Xin chân thành cảm ơn.

Nguyễn Xuân Xanh và Phạm Xuân Yêm

Chương 1

MÔ HÌNH CHUẨN VÀ HẠT HIGGS

MÔ HÌNH CHUẨN CỦA VẬT LÍ HẠT CƠ BẢN

Phạm Xuân Yêm

Khi thuyết Tương đối rộng của Einstein thay thế thuyết Vạn vật Hấp dẫn của Newton, nó không nhằm chỉnh sửa đôi chút định luật nghịch đảo bình phương mà là loại bỏ khái niệm cơ bản cho rằng hấp dẫn là lực hút một vật thể bởi các vật thể khác. Trong thuyết Tương đối rộng, ta không đề cập đến lực mà quan tâm đến độ cong của không gian và thời gian. Tuy hệ quả - của việc thay thế luật hấp dẫn Newton bằng thuyết Tương đối rộng - là có sửa đổi chút xíu (nhỏ hơn một phần triệu) những tiên đoán về sự vận hành của Hệ Mặt Trời, nhưng thuyết của Einstein đã làm một cuộc cách mạng trong nhận thức về tự nhiên. Ngày nay, chúng ta cần một cuộc cách mạng khác nữa.

Steven Weinberg*

Tóm tắt - Vật lí hạt cơ bản có mục tiêu tìm hiểu, tiên đoán, phân loại, sắp xếp, khám phá những đặc tính cũng như những định luật chi phối sự vận hành của các thành phần sơ cấp cấu tạo nên vật chất trong toàn vũ, góp phần vén mở những kì diệu của thiên nhiên.

Mô hình Chuẩn (the Standard Model, SM) của vật lí vi hạt là lí thuyết diễn tả toàn vẹn và nhất quán hệ thống của những "viên gạch" sơ cấp của vật chất dưới tác động của ba trong bốn lực cơ bản của Tự nhiên: lực điện-từ, lực hạt nhân mạnh và lực hạt nhân yếu để từ đó vạn vật hình thành và biến hóa.

---

* Night thoughts of a quantum physicist. Bulletin of the American Academy of Arts and Sciences, Vol. 49, No. 3 (Dec., 1995), pp. 51-64.

Lực hấp dẫn, diễn tả bởi thuyết Tương đối rộng, là lực cơ bản thứ tư mà sự hòa nhập với ba lực của SM hãy còn là câu hỏi để ngỏ chưa có giải đáp, đó chính là cuộc cách mạng mà Weinberg nêu ra, do đó trọng lực không là đối tượng của bài viết.

Bài gồm bốn phần:

PHẦN I: Nhập đề, phác họa và dẫn giải tổng quan để độc giả làm quen với những thuật ngữ và khái niệm chủ yếu của SM, qua đó có cái nhìn bao quát về những đề tài của thế giới vi mô còn được gọi là thế giới lượng tử.

PHẦN II: Mô tả những hiện tượng điển hình liên quan đến các hạt quark, thành phần cơ bản của hạt nhân nguyên tử. Quark bị chi phối chủ yếu bởi lực mạnh gắn kết chúng để cấu tạo nên hadron gồm hai loại là baryon (hạt có spin bằng 1/2 mà điển hình là proton và neutron) và meson (spin 0,1). Trong tiến trình khám phá ra lực mạnh, lí thuyết Yukawa đóng vai trò mở đường, theo đó tương tác của các baryon là do sự trao đổi các meson giữa chúng. Thế năng Coulomb 1/R của lực điện-từ và thế năng Yukawa e^{-mR}/R của lực mạnh là do trao đổi photon và meson, với khối lượng 0 và m, theo thứ tự. Thế năng Coulomb là một trường hợp đặc biệt của thế năng phổ quát Yukawa: khi $m \to 0$, $e^{-mR}/R \to 1/R$, m càng lớn thì tầm truyền R của lực càng nhỏ, photon không có khối lượng nên lực điện-từ truyền đi vô hạn (nguyên lí bất định $Rm \sim \hbar$).

Nguyên lí đối xứng được khai thác với dụng cụ toán học là nhóm SU(3) để khám phá những tính chất đặc thù, phong phú của các hạt cơ bản, thứ nhất là hương và sắc của quark, thứ hai là công thức phổ quát GNN (Gell-Mann, Nakano, Nishijima) chi phối các hadron, các hạt cơ bản và các lực. Công thức GNN cũng là kim chỉ nam định hướng cho sự hòa nhập giữa lực điện-từ và lực yếu, chủ đề của PHẦN IV.

Tựa như bảng tuần hoàn Mendeleev trong hóa học, các nhóm bội baryon và meson có thể sắp xếp theo hình tám cạnh đều đặn mà Gell-Mann đã mượn danh từ Bát chính đạo của nhà Phật để miêu tả chúng.

PHẦN III: Trình bày phương pháp cơ bản để khám phá ra Sắc động học lượng tử (Quantum Chromodynamics - QCD), định luật chi phối sự vận hành của quark. Trước hết cần thấu hiểu một nguyên lí cực kì phong phú

gọi là Đối xứng Chuẩn Định xứ (local gauge symmetry), nền tảng của Điện động học lượng tử (Quantum Electrodynamics - QED), tức là thuyết về lực điện-từ đã được hoàn tất thời tiền SM. Nguyên lí này được mở rộng và khai thác để khám phá ra hai định luật cơ bản khác của SM là QCD (ở PHẦN III) và điện-yếu (Electroweak) (ở PHẦN IV).

QED $\Rightarrow$ đối xứng chuẩn định xứ $\Rightarrow$ QCD và điện-yếu

Đối xứng chuẩn xác định là phải tồn tại những boson chuẩn mang spin 1 để truyền tải lực cho quark và lepton tương tác, những boson này tuân theo phương trình Maxwell (cho photon của lực điện-từ) và Yang-Mills (cho gluon của lực mạnh và *W, Z* của lực yếu). Hai tính chất đặc thù của QCD là "Tự do tiệm cận" và "Nô lệ hồng ngoại" giải thích quark và gluon bị gắn chặt không thoát được ra ngoài hadron ở nhiệt độ (năng lượng) thấp. Trái lại năng lượng càng cao thì quark và gluon càng tự do, không bị gắn kết chặt chẽ trong hadron. Đó chính là trạng thái của vật chất ở thuở Big Bang và ở các máy gia tốc có năng lượng cực kì lớn.

PHẦN IV: Dành cho lực hạt nhân yếu và sự hòa nhập của nó với lực điện-từ để trở thành thuyết điện-yếu, đỉnh cao của SM. Bố cục của PHẦN IV gồm ba chủ đề:

Mở đầu với neutrino và hai tính chất đặc thù của lực yếu là sự vi phạm đối xứng phải-trái (P), và đối xứng vật chất-phản vật chất (CP).

Thứ hai, khi nghiên cứu hai hiện tượng đặc trưng của lực yếu: "kì tính" biến chuyển thành "phản kì tính" với Glashow, Iliopoulos, Maiani (GIM) và sự vi phạm đối xứng CP với Kobayashi, Maskawa (KM), các tác giả trên đã tiên đoán (và thực nghiệm sau đó xác nhận) sự hiện hữu của ba loại vật chất mới lạ là các quark duyên (charm, *c*), đáy (bottom, *b*) và đỉnh (top, *t*); minh họa mối tương quan sâu sắc giữa hai lực mạnh và yếu.

Cuối cùng định luật chi phối lực yếu được khám phá qua hai giai đoạn:

• Đối xứng chuẩn và thuyết Yang-Mills với nhóm SU(2) liên kết hai dòng trung hòa điện tích của lực yếu và lực điện-từ để hòa nhập chúng.

• Cơ chế BEH (Brout, Englert, Higgs) - tên của ba trong sáu tác giả đã đề xuất nó - thể hiện sự *phá vỡ tự phát* của phép đối xứng chuẩn bởi trường Higgs để mang khối lượng cho hai boson *W, Z* của lực yếu.

Sự phát hiện boson Higgs ở CERN ngày 4 tháng 7 năm 2012 cùng với giải Nobel Vật lí 2013 vinh tặng François Englert và Peter Higgs chứng kiến một chương cũ vừa khép lại và một chương mới mở ra trong vật lí hạt. Khép chương cũ vì đã hoàn tất một đoạn đường dài là tất cả 17 loại hạt cơ bản đều được thực nghiệm khám phá đầy đủ. Điều này khẳng định sự vững chắc của SM, một hệ hình mà từ đây mọi phát triển sau này đều phải dựa vào để vươn xa hơn nữa. Mở chương mới, vì cơ chế BEH thực sự lên ngôi. Cơ chế này có thể ảnh hưởng đến nhiều ngành khác, nó ra đời như một liên đới sâu sắc giữa hai ngành khác biệt: vật lí chất ngưng tụ (siêu dẫn điện-từ) và vật lí hạt (lực yếu của neutrino). Đây là lần đầu tiên con người khám phá ra một lực mới lạ, diễn tả bởi trường Higgs, mang khối lượng cho vật chất, có thể coi như lực cơ bản thứ năm của Tự nhiên bên cạnh bốn lực quen thuộc trước đó.

Bốn phần đều tương đối độc lập. Những chi tiết mang tính kĩ thuật đều được giải thích trong phần Chú thích cuối bài.

PHẦN I. NHẬP ĐỀ

Neutrino là mảnh nhỏ nhất của thực tại vật chất mà con người từng hình dung ra, cái lớn nhất là vũ trụ.

Clyde Cowan và Frederick Reines

Trong câu mở đầu của bản báo cáo về sự kiện lần đầu tiên phát hiện ra vi hạt neutrino ở lò phản ứng hạt nhân Savannah River (South Carolina, Mĩ), hai nhà vật lí Cowan và Reines (giải Nobel 1995) dùng cụm từ *hình dung ra*, điều gây chút ngạc nhiên cho người viết bài này khi đọc câu đó lần đầu, nhưng ngẫm lại mới thấy sâu sắc.

Thực thế, khi con người xây dựng được một hệ thống những ý tưởng và suy luận chặt chẽ, nhất quán cùng những ngôn từ tương xứng để diễn tả và giải thích thế giới bên ngoài cũng như khám phá những hiện tượng

mới lạ và những định luật chi phối sự vận hành của chúng, thì theo nghĩa đó họ đã *hình dung ra* thực tại của Tự nhiên mà Hạt cơ bản và Vũ trụ là ví dụ điển hình về cái mà chúng ta hiểu biết về hai thế giới thái cực vô cùng nhỏ cũng như vô cùng lớn đó. Hạt cơ bản có vai trò gì trong cuộc tìm kiếm cội nguồn của con người trong vũ trụ nối quá khứ với tương lai, chúng ta từ đâu đến, là gì, về đâu, những câu hỏi muôn thuở.

Quan điểm về hạt cơ bản (viên gạch vi mô không thể chia cắt cấu tạo nên vật chất) hay vũ trụ (tổng thể vĩ mô bao trùm vạn vật cả không gian và thời gian) không duy nhất mà thay đổi, cách tiếp cận về bản chất của chúng thăng trầm theo các thời đại và các nền văn hiến.

Hết rồi thời xa xưa khi kim, mộc, thủy, hỏa, thổ là 5 thành phần sơ cấp cốt lõi của vật chất. Mới cách đây trăm năm thôi phân tử được coi là hạt sơ đẳng. Ngày nay chúng ta biết phân tử chỉ là tập hợp của nhiều nguyên tử khác nhau liên kết bởi electron ngoại vi, mà mỗi nguyên tử lại được cấu tạo bởi hạt nhân của nó với những electron dao động xung quanh, rồi hạt nhân nguyên tử cũng do proton cùng neutron kết hợp với nhau mà thành, sau hết proton và neutron là do các quark u, d cấu tạo nên và gắn kết bởi gluon. Cứ thế như những con búp bê Nga liên hồi chứa đựng nhau, chuỗi dài của những vi hạt đi từ phân tử đến quark là cả một quá trình sáng tạo, khám phá bền bỉ, lí thuyết và thực nghiệm liên kết chặt chẽ.

Cũng vậy, nhận thức về vũ trụ biến đổi từ thuyết địa tâm trước thời Copernicus, Galileo cho tới thuyết Vụ nổ lớn (Big Bang) hiện đại, theo đó ở thuở nguyên sơ cách đây gần 14 tỉ năm, vũ trụ là một tụ điểm kì dị cực nóng cực đặc đã nhanh chóng dãn nở, tuy gia tốc dãn nở đã giảm dần trong khoảng 7 tỉ năm đầu nhưng sau đó lại vụt tăng lên. Một phạm trù kì diệu nhưng khác với hạt cơ bản nên sẽ không đề cập tiếp ở đây.

Khoa học nói chung là hành trình khám phá liên hồi, không có điểm tận cùng.

Vật lí hạt cơ bản có mục tiêu tìm kiếm, phân loại các thành phần sơ cấp của vật chất và phám khá những tính chất cũng như những định luật cơ bản chi phối sự vận hành của chúng.

SM là lí thuyết diễn tả toàn vẹn và giải thích nhất quán những đặc trưng của những viên gạch sơ đẳng cấu tạo nên vật chất, dưới tác động của 3 trong 4 lực cơ bản của Tự nhiên: lực điện-từ, lực hạt nhân mạnh và lực hạt nhân yếu để từ đó vạn vật được hình thành và biến hóa. Hạt cơ bản tiêu biểu hơn cả là electron được khám phá lần đầu tiên bởi Joseph John Thomson năm 1897. Electron chính là gốc nguồn của hiện tượng điện-từ mà ngay từ thời xa xưa con người đã cảm nhận thấy khi nhìn sấm sét cũng như khi chà xát hổ phách. Từ ánh đèn lân quang thời xa xưa đến iPad tân kì thời nay, dấu ấn của electron vô hình trung ngày càng đậm nét trong đời sống con người.

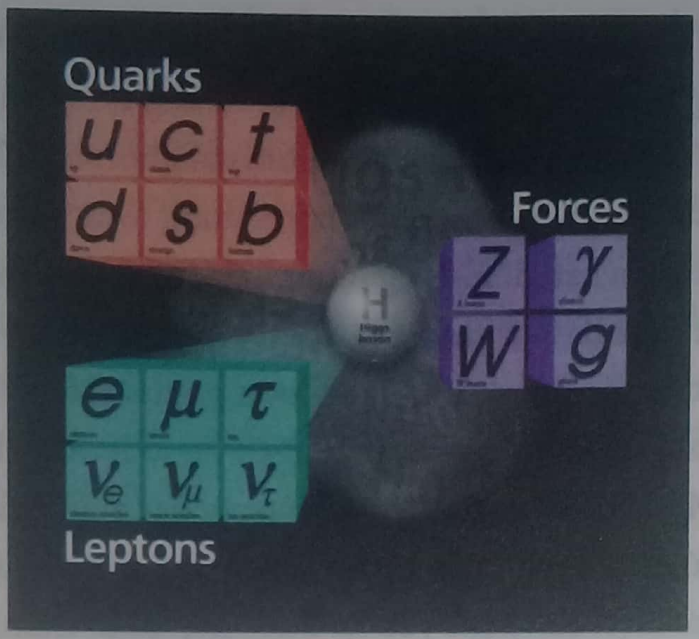
Hiện tình của các hạt cơ bản[1] được tóm lược trong sơ đồ (Hình 1), chúng gồm ba phần: thứ nhất là mười hai hạt có spin 1/2 như quark và lepton được gọi ngắn gọn là trường vật chất; thứ hai là bốn boson chuẩn có spin 1 gồm photon γ của lực điện-từ, gluon g của lực mạnh, hai boson W, Z của lực yếu, gọi chung là trường lực tác động lên các hạt vật chất quark và lepton; thứ ba là boson Higgs có spin 0 đóng vai trò chủ yếu tạo nên khối lượng cho vạn vật.

---

[1] Những thuật ngữ như Lượng tử, Trường lượng tử, Tái chuẩn hóa, Spin, Sắc tích, Quark, Lepton, Phản quark, Phản vật chất, Đối xứng chuẩn, Phá vỡ tự phát, Cơ chế BEH... sẽ dần được đề cập, giải thích trong những Phần II, III, IV.
Rất khó soạn một cuốn sách giáo khoa về ngành vật lí hạt ở trình độ cử nhân, nhưng nếu chọn thì có lẽ đây là cuốn sách hay và dễ đọc nhất, có thể sử dụng miễn phí trên https://notendur.hi.is/~ath68/griffiths.pdf.
Tác giả David Griffiths của cuốn sách cho rằng đây là thời điểm để đưa môn vật lí hạt vào chương trình cử nhân vật lí đại cương.

Tài liệu tham khảo:

- Hồi kí của hơn 40 tác giả tiêu biểu (với 14 giải Nobel) đã khám phá ra SM:
The Rise of the Standard Model, Ed. by Lillian Hoddeson, Laurie Brown, Michael Riordan, and Max Dresden, Cambridge University Press (1997).
- Yoichiro Nambu, *Quarks, World Scientific* (1985).
- Steven Weinberg, *The Making of the Standard Model*, arXiv: hep-ph 0401010, (2004).
- Về hạt Higgs liên đới đến hiện tượng Siêu dẫn điện-từ (đặc biệt xem bài của Anderson, Cooper, Nambu) http://www.conferences.uiuc.edu/bcs50/video.html.



Hình 1. Sơ đồ các hạt cơ bản trong SM.
Ở trung tâm hình, duy nhất boson Higgs có màu xám nhạt như để nhắc nhở là hạt này tuy là điểm mấu chốt của SM để mang khối lượng cho hai boson chuẩn W, Z của lực yếu cũng như cho quark và lepton, nhưng tại thời điểm của hình vẽ lại chưa được thực nghiệm khẳng định, trong khi quark, lepton, boson chuẩn Z, W, γ, g đã được thực nghiệm xác nhận là hiện hữu. Rất có thể, màu xám của hạt Higgs sẽ rực rỡ ánh vàng vì hai nhóm thực nghiệm ATLAS và CMS ở CERN vừa tìm ra dấu vết của nó trong máy siêu gia tốc Large Hadron Collider (LHC) ngày mồng 4 tháng 7 năm 2012.

Vật chất (quark cũng như lepton) tương tác với nhau qua sự trao đổi các boson chuẩn. Boson chuẩn có vai trò làm trung gian nối kết và truyền tải lực để các viên gạch vật chất cơ bản (quark hay/và lepton) tương tác với nhau.

Có 6 loại quark mang kí hiệu *u* (up), *d* (down), *s* (strange), *c* (charm), *t* (top), *b* (bottom) và 6 loại lepton bao gồm 3 hạt e^- (electron), μ^- (muon), τ^- (tauon) mang điện tích âm *-e*, và 3 hạt neutrino ν_e, ν_μ, ν_τ trung hòa điện tích, theo thứ tự 3 hạt neutrino này bao giờ cũng sánh đôi với 3 hạt electron, muon, tauon trong tương tác của chúng. Sự cân bằng số lượng 6 loại quark và 6 loại lepton không phải ngẫu nhiên mà có liên quan sâu sắc đến tính đối xứng chuẩn và tính tái chuẩn hóa trong lí thuyết trường lượng tử, nền tảng trên đó SM được xây dựng.

Lực mạnh gắn kết hạt cơ bản quark *u*, *d* trong hạt nhân nguyên tử và làm cho vật chất vững bền. Lực điện-từ thể hiện sự tương tác của electron

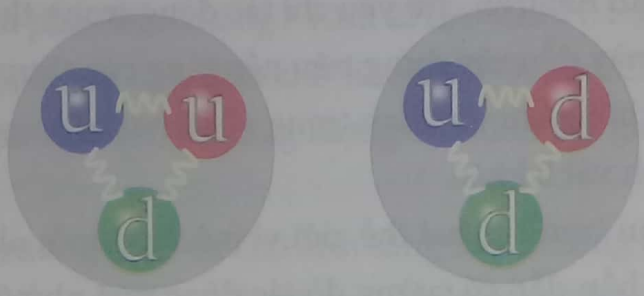
với hai quark *u*, *d* trong hạt nhân nguyên tử để tạo nên nguyên tử của các nguyên tố trong bảng tuần hoàn Mendeleev cũng như của các tế bào sinh vật trên trái đất. Lực yếu của quark và lepton chi phối sự phân rã của các hạt nhân nguyên tử, các phản ứng nhiệt hạch trong lòng các ngôi sao, mang ánh sáng cho bầu trời ban đêm cũng như phát tán hàng tỉ hạt neutrino từng giây đang xuyên qua da thịt chúng ta.

Lực mạnh của các quark trao đổi gluon *g* giữa chúng với nhau được gọi là QCD, thuật ngữ này mô phỏng QED, đó là lí thuyết đã được hoàn tất thời "tiền SM" để diễn tả lực điện-từ của các hạt mang điện tích trao đổi photon γ. Do đó SM bao gồm lực mạnh (QCD), lực điện từ (QED) và lực yếu; hơn nữa lực điện-từ và lực yếu lại được hợp nhất thành lực điện-yếu.

Nếu điện tích là tính chất đặc trưng gắn bó với lực điện-từ cũng như khối lượng với lực hấp dẫn, thì sắc tích (color charge) là để chỉ định thêm một tính chất lượng tử đặc trưng của các hạt quark. Cũng như danh từ quark, danh từ sắc dùng ở đây là thuật ngữ riêng của ngành vật lí hạt cơ bản, nó không có mối liên hệ nào với màu sắc xanh, đỏ trong ngôn ngữ thông thường. Thực thế, trong vật lí lượng tử, có một định lí liên kết spin với phép thống kê Fermi-Dirac, theo đó các fermion (hạt có spin 1/2) không thể cùng ở trong một trạng thái vật lí xác định bởi năng lượng, spin, vận tốc, vị trí, hay bất kì một đặc tính nào khác. Ví dụ hai fermion khi ở chung một điểm không gian thì chúng phải có hoặc vận tốc hoặc chiều quay của spin khác nhau; nếu cùng vận tốc thì spin của chúng phải quay ngược chiều hoặc không ở cùng một vị trí. Đó là những hạt có tính chất mạnh mẽ, sự phân bố trạng thái các hạt fermion phải tuân theo phép thống kê Fermi-Dirac. Thống kê này có thể phần nào giải thích tại sao xấp xỉ cùng một mật độ electron nhưng có vật cách điện, có vật lại dẫn điện, thậm chí siêu dẫn điện-từ. Tính chất này của các fermion hoàn toàn trái ngược với tính hòa đồng, chung sống của các boson (mang spin số nguyên như 0, 1) minh hoạ bởi chùm ánh sáng laser với nhiều photon ở trong cùng một trạng thái.

Vì quark là fermion nên khi 3 quark *u*, *u*, *d* kết hợp với nhau ở trạng thái căn bản (năng lượng liên kết cực tiểu) để tạo thành proton thì sự kết

hợp đó phải phản đối xứng (đổi dấu) trong bất kì sự giao hoán nào giữa các cặp fermion. Tính phản đối xứng này chỉ được hình thành khi các quark, ngoài điện tích và khối lượng, phải mang thêm một tính chất mới lạ nữa để chúng tự khác biệt với nhau, mỗi quark phải có thêm 3 đặc trưng nữa (xem Hình 2). Thay vì quy ước gán ba đặc tính lượng tử này của quark bằng ba con số 1, 2, 3 hoặc ba chữ cái a, b, c thì các nhà vật lí hạt dùng ba màu đỏ, xanh, lam mang tên sắc tích. Giả thiết về 3 sắc tích của quark sau đó được chứng minh chính xác bởi nhiều thực nghiệm khác nhau và sẽ được đề cập trong những Phần II, III, IV.



Hình 2. Ba sắc tích của quark

Quark, ngoài điện tích còn mang 3 sắc tích, tượng trưng bởi 3 màu. Neutron (phải) cấu tạo bởi hai quark d và một quark u, còn proton (trái) bởi hai quark u và một quark d. Ba sắc tích khác nhau của quark được cân bằng đều đặn để cuối cùng proton và neutron trung hoà sắc tích, cũng như điện tích âm và dương của electron và proton cân bằng để nguyên tử trung hòa điện tích.

Quark khác lepton ở chỗ là ngoài sắc tích (lepton không có sắc tích), chúng cũng mang điện tích, nhưng điện tích của chúng không phải là số nguyên *-e* như electron mà $+(2/3)e$ cho ba quark *u, c, t* và $-(1/3)e$ cho ba quark *d, s,* b.

Chính vì quark có cả điện tích và sắc tích nên chúng bị chi phối bởi cả 3 lực: điện-từ, hạt nhân yếu, hạt nhân mạnh. Còn electron, muon, tauon vì mang điện tích và không có sắc tích nên chỉ bị tác động bởi 2 lực: điện-từ và yếu. Neutrino không có cả điện tích lẫn sắc tích nên bị tác động đuy nhất bởi lực yếu.

Hai lực điện-từ và yếu, tuy khác biệt về cường độ tương tác hiệu dụng, nhưng lại có nhiều đặc tính chung nên kết hợp được trong một tương tác

duy nhất gọi là điện-yếu, một trong hai lí thuyết trụ cột của SM; trụ cột thứ hai là QCD diễn tả lực hạt nhân mạnh. Sự thống nhất hai hiện tượng điện-từ và yếu trong cùng một quy luật là bước tiến lớn của vật lí cuối thế kỉ 20, có thể ví như sự tổng hợp ba hiện tượng điện, từ và quang cuối thế kỉ 19. Hai nguyên lí nền tảng, làm ngọn hải đăng chỉ đường cho sự hợp nhất này, là đối xứng chuẩn định xứ và sự phá vỡ tự phát của nó. Sự phá vỡ đối xứng một cách tự phát này được gọi là cơ chế BEH, có nhiệm vụ mang khối lượng cho vạn vật.

Lực cơ bản thứ tư, lực hấp dẫn (diễn tả bởi thuyết Tương đối rộng) tạo nên cấu trúc của vũ trụ bao la và chi phối sự vận hành của các thiên thể, còn ba lực phi hấp dẫn nói trên chủ yếu chỉ tác động trong thế giới vi mô của vật lí hạt; ba lực này đều xây dựng trên nền tảng của thuyết lượng tử. Tuy nhiên lượng tử không chỉ giới hạn trong vật lí hạt mà còn tác động trong hầu hết các ngành vật lí khác.

Dẫu hiện diện trong cả hai thế giới vi mô và vĩ mô, nhưng ở vùng hạ nguyên tử vì lực hấp dẫn có cường độ tác động quá nhỏ (khoảng 10^{-39}) so với ba lực kia nên có thể bỏ qua.

Trái lại, tại những thời khắc ban đầu của Vụ nổ lớn hay khi một số thiên thể tàn lụi để trở thành lỗ đen (Black hole), trong một không gian nén ép vô cùng nhỏ với năng lượng và nhiệt độ vô cùng lớn (gọi chung là bức tường Planck), thì cường độ trọng lực lại rất mạnh, tương tự với cường độ của ba lực phi hấp dẫn. Vì tất cả bốn lực đó cùng đóng vai trò chủ chốt trong lỗ đen và trong cái không-thời điểm Big Bang ban đầu đó, chúng phải mặc nhiên hòa nhập với nhau trong cùng một quy luật, hệ thống chặt chẽ và nhất quán để lí giải mọi hiện tượng. Tuy nhiên, sự thống nhất cần thiết này giữa hai cột trụ của vật lí là Tương đối rộng và Lượng tử cho đến nay chưa thực hiện nổi, mặc dù đã có nhiều cố gắng trong nhiều năm qua. Nguyên do chính yếu là không như ba lực phi hấp dẫn đã thành công trong việc được lượng tử hóa và tái chuẩn hóa, thuyết Tương đối rộng chưa thể nhất quán hòa hợp với Lượng tử. Đó là vấn đề hóc búa số một của vật lí hiện đại, nó đòi hỏi một cuộc cách mạng trong nhận thức về Tự nhiên mà Weinberg gợi lên ở trang đầu bài viết này.

Tạm gác lại câu hỏi trên, ta trở về với SM của hạt cơ bản với khoảng 30 giải Nobel Vật lí trong ba mươi năm gần đây, Thuyết điện-yếu và QCD tuy mới ra đời những năm 1970, khoảng thời gian tương đối ngắn so với nhiều ngành khoa học khác trong tiến trình khám phá (lí thuyết và thực nghiệm luôn liên kết hỗ tương nhau), SM đã mang lại cả một kho tàng tri thức khoa học đồ sộ, tiên đoán nhiều hiện tượng và hạt mới lạ cũng như những tính chất độc đáo của chúng mà sau đó đều được thực nghiệm kiểm chứng với độ chính xác đáng kinh ngạc. Hãy tạm kể sự khám phá dòng trung hòa điện tích của lực hạt nhân yếu; ba loại quark *c*, *t*, *b*; hai boson chuẩn *W*, *Z*; chỉ hiện hữu có ba loại neutrino với khối lượng cực kì nhỏ; hạt khối lượng $\approx 125\ \text{GeV}/c^2$ vừa phát hiện tháng 7 năm 2012 ở CERN. Sự kiện lịch sử này được các nhà vật lí hồi hộp đón chờ từ năm 1994 khi CERN quyết định xây dựng máy gia tốc LHC có năng lượng cao nhất thế giới để săn tìm hạt Higgs.

Cũng như trường điện-từ cho ánh sáng hay trường trọng lực lôi hút vạn vật, trường Higgs tràn đầy vũ trụ. Nó gợi ra cách tiếp cận mới về khối lượng của vật chất, khác với quan điểm cố hữu coi khối lượng là cái gì cho trước bởi Tự nhiên mà không ai thấu hiểu nguồn gốc sâu xa. Theo SM, khối lượng của vật chất được tạo ra bởi sự tương tác của chúng với trường Higgs đã tồn tại trong chân không của vũ trụ ngay từ Vụ nổ lớn. Khởi đầu tất cả đều không có khối lượng, do tương tác với trường Higgs mà vật chất mang khối lượng, nặng hay nhẹ tùy theo cường độ tương tác của chúng, càng tác động mạnh với trường Higgs thì vật chất càng có khối lượng lớn.

Không có trường Higgs thì không có vật chất cũng như lực gắn kết chúng để tạo nên tinh tú, vũ trụ, do đó cũng không thể có sinh vật và con người.

Tuy trường Higgs mang khối lượng cho vạn vật, nhưng cái gì mang lại khối lượng $125\text{GeV}/c^2$ cho chính hạt boson Higgs? Đó là câu hỏi đầu tiên còn bỏ ngỏ. Ngoài ra khoảng 96% năng-khối lượng của vũ trụ (được gọi là năng lượng tối và vật chất tối) hãy còn nằm ngoài sự hiểu biết hiện nay của con người. Như vậy SM không phải là giải đáp cuối cùng của mọi vấn đề

cơ bản vì hiển nhiên trong SM hãy còn nhiều thông số và hạt mà chúng ta chưa thấu hiểu.

Một chân trời kì thú đang đón chờ, nhưng trước hết chúng ta hãy cùng nhau học hỏi những điều mà bao người siêu việt đi trước đã khai phá. Trước khi đi vào chi tiết của SM trong những phần sau, chúng ta hãy điểm qua vài nét tổng quan đặc thù của ngành vật lí hạt cơ bản:

1- Cách tiếp cận quy giản qua sự tìm kiếm định luật căn bản thuộc về ranh giới của tri thức. Trong khi đó, nhiều ngành vật lí khác có cách tiếp cận hiệu dụng và đột khởi thiên về tìm hiểu, khám phá những hiện tượng xảy ra trong các trạng thái vật chất, tức là những nghiệm số (tương ứng với những điều kiện cụ thể nào đó) của những định luật cơ bản mà SM khám phá ra. Ví dụ, hạt electron tuân thủ phương trình cơ bản Dirac, còn vật lí chất rắn khai thác những tính chất phong phú của chất bán dẫn, siêu dẫn do tác động của electron trong những điều kiện đa dạng của vật chất.

Dưới cách nhìn quy giản của nhà vật lí hạt cơ bản thì tính chất của các hệ thống vật chất, dù phức tạp và phong phú đến mấy, đều đương nhiên là phải như vậy bởi vì chúng đều được cấu tạo bởi những viên gạch sơ cấp tuân thủ những nguyên lí của SM và đều được điều hành bởi ba lực cơ bản: điện-từ, mạnh và yếu.

Một bên tìm kiếm phương trình cơ bản chi phối sự vận hành tổng thể của vật chất, bên kia tìm tòi khai thác các nghiệm số phong phú đa dạng của phương trình cơ bản trong những điều kiện khác nhau của môi trường vĩ mô mà vật chất được đặt vào. Hai cách tiếp cận quy giản và đột khởi bổ sung cho nhau, cũng như nghiên cứu cơ bản và ứng dụng đan xen lẫn nhau, không có cái này thì không có cái kia.

2- Những công nghệ tân tiến mũi nhọn về vật liệu, điện tử, siêu dẫn, máy tính được tận dụng và khai thác để xây dựng những máy siêu gia tốc và những công cụ thực nghiệm cực kì to lớn, phức tạp và tinh vi nhằm phân tích, khám phá những hạt cơ bản và hiện tượng mới lạ, kiểm chứng hoặc bác bỏ những đặc tính của các hạt mà lí thuyết tiên đoán hay đề xuất. Ngành vật lí này đôi khi được gọi một cách trào phúng là

"Đại khoa học" (Big Science) vì những máy gia tốc và máy dò tìm hạt đều khổng lồ, được ví như những giáo đường hay kim tự tháp kì vĩ thời xa xưa.

3- Sự cộng tác trao đổi thường xuyên và cần thiết giữa những nhà vật lí hạt trên thế giới và sự tập trung nghiên cứu trong một vài cơ quan quy mô quốc tế với hàng ngàn nhà vật lí thường trực như CERN, DESY ở Âu châu, Fermi-lab, SLAC, Brookhaven ở Mĩ châu, KEK ở Nhật Bản.

Sự kiện thành lập CERN là một bài học vượt xa đối tượng khoa học thuần tuý. Trên cánh đồng hoang lác đác mấy chú bò ăn cỏ ở Ferney-Voltaire biên giới Pháp-Thụy Sĩ, ngay sau Thế chiến thứ II, nhiều nhà vật lí Âu châu từng di tản khắp nơi vì nạn phát xít đã trở về cùng đồng nghiệp xây dựng nên CERN. Vì hòa bình và phát triển qua nghiên cứu cơ bản, với sự hỗ trợ tích cực của một số chính khách Pháp, Đức, Anh có tầm nhìn xa, họ đã chung sức mở đường cho sự hồi sinh và hòa giải của các nước Âu châu. Mỗi nước riêng lẻ không thể đủ nhân sự và phương tiện để hoàn thành sứ mạng, nguyên tắc tổ chức của CERN - tập hợp đóng góp tài năng, ngân quỹ từ nhiều nước - đã tiên phong làm mô hình cho nhiều ngành hoạt động khoa học khác phỏng theo từ thiên văn, sinh học, thậm chí cả chính trị vì CERN ra đời nhiều năm trước Liên minh Âu châu. Mạng lưới toàn cầu (world wide web) của internet ra đời khoảng năm 1990 ở cơ quan này là một trong những thành công kì diệu của ứng dụng nghiên cứu cơ bản; máy chụp hình scanner trong y học, công nghệ siêu dẫn điện-từ tạo nên những khối nam châm khổng lồ là vài ví dụ khác. Hơn nữa, CERN còn dang tay đón mời sự cộng tác của những tài năng đến từ khắp mọi miền trên trái đất, kể cả những nước đang phát triển. Đây là cơ hội ngàn vàng đối với các tài năng trẻ Việt Nam để tiếp cận với nghiên cứu quốc tế trong những lĩnh vực thuộc ranh giới của tri thức nhân loại.

PHẦN II. CHUYỆN KỂ VỀ QUARK

Vậy là trong những khái niệm vật lí và hóa học, chắc chắn từ nay chúng ta phải đưa vào một yếu tố gián đoạn, nhảy từng bước; điều mà trước đây vài năm không ai ý thức.

Marcel Brillouin

Yếu tố gián đoạn mà Brillouin đề cập được gọi là *lượng tử* (quantum), có nghĩa là *đại lượng cơ bản*, nền tảng trên đó xây dựng SM; vậy chúng ta trước hết hãy làm quen với thuật ngữ này và vài khái niệm khác luôn gắn kết với nó như spin, phản vật chất, sắc tích và hương vị của quark.

IIa. Một thoáng lượng tử, đơn vị năng lượng cơ bản

Những viên gạch cơ bản của vật chất vẫy vùng trong thế giới của Lượng tử, vậy khái niệm này là gì, đến từ đâu? Vào cuối thế kỉ thứ 19, một mâu thuẫn căn bản được phát hiện giữa lí thuyết điện-từ và nhiệt động học - hai trụ cột của vật lí thời ấy - với thực nghiệm về cường độ bức xạ của vật đen[2]. Thực thế, hai lí thuyết đó đưa đến một hệ quả phi lí là tổng năng

---

[2] Vật đen (black body) là một vật chỉ hấp thụ ánh sáng mà không phản chiếu lại, vậy năng lượng nó nhận được không bị mất đi. Từ "đen" được dùng để chỉ định tính chất đặc thù này. Một ví dụ tiêu biểu của vật đen là một lò bịt kín nung nóng ở nhiệt độ T, đục một lỗ nhỏ trên thành lò, ta có thể nghiên cứu phổ bức xạ nhiệt phát ra qua lỗ. Bức xạ này chỉ phụ thuộc vào nhiệt độ T chứ không vào hình dạng, cấu trúc của lò cũng như chất liệu trong lò, điều này chứng tỏ bức xạ nhiệt của vật đen chỉ phụ thuộc vào sự dao động của các thành phần cơ bản chung cho mọi vật chất. Sự dao động của các vi hạt đó tạo ra nhiệt độ của vật chất. Như vậy phổ bức xạ nhiệt của vật đen là một trường hợp hi hữu trong vật lí có tính phổ quát tuyệt đối, đó là một hàm $F(T,\nu)$ chỉ tùy thuộc vào nhiệt độ T và tần số ν của ánh sáng bức xạ, mỗi tần số gắn liền với một màu (từ đỏ sang tím) của ánh sáng.
Trong những năm từ 1900 đến 1905, dùng nhiệt động học và thuyết điện-từ cổ điển, Lord Rayleigh (được bổ sung bởi Sir James Jeans) rồi sau đó đến Albert Einstein đều phát hiện ra kết quả phi lí là tổng cường độ bức xạ của vật đen phải tăng vô hạn. Nghịch lí này được giải đáp với giả thuyết lượng tử $E = h\nu$ và ngày 14 tháng 12 năm 1900, Max Planck dùng giả thuyết này để tìm ra công thức cho phổ bức xạ $F(T,\nu)$ của vật đen, công thức chính xác và phổ quát đến nỗi nó áp dụng từ lò kín nung nóng của phòng thí nghiệm ở Đại học Berlin thế kỉ 19 cho đến bức xạ nền của Vũ trụ sau Vụ nổ lớn mà ngày nay hai vệ tinh COBE và WMAP đo lường được tàn dư nhiệt lượng phóng xạ cách đây khoảng 13,7 tỉ năm (giải Nobel Vật lí 2006). Biết đâu trăm năm sau, ở thế kỉ 22, con người sẽ đo được bức xạ của một vật đen khác kì dị hơn, đó là lỗ đen lượng tử hóa (theo J.D. Bekenstein và S. Hawking) nên có thể phóng xạ

lượng phóng xạ bởi vật đen phải vô hạn, nói một cách nôm na nếu ngồi trước một bếp sưởi hồng, bất kì nhiệt độ cao hay thấp ta sẽ bị tiêu hủy hết. Hệ quả phi lí này chỉ có thể được giải quyết nếu có một yếu tố hoàn toàn mới lạ bổ sung cho hệ hình cổ điển trên. Yếu tố đó gọi là lượng tử, tức là đơn vị gián đoạn của năng lượng, một giả thiết mà Max Planck đưa ra để giải thích phổ bức xạ do dao động của các vi hạt trong vật đen.

Theo ông kể, để tìm được công thức phù hợp chính xác với thực nghiệm về bức xạ của vật đen, Planck đành đưa ra - như một hành động tuyệt vọng - một tiền đề theo đó các vật thể vi mô khi dao động với tần số ν, thì năng lượng E chúng phát ra phải là những đơn vị rời rạc như $1h\nu$, $2h\nu$, $3h\nu$..., gọi chung là lượng tử. Thật là cách mạng, trái ngược với trực giác và định kiến, năng lượng được phân bố theo từng đơn vị $h\nu$ lẻ tẻ. Tựa như giữa 0 và 1 có muôn vàn số liên tục không sao đếm xuể, nhưng chỉ có mười con số thập phân là 0.1, 0.2,... 1. Chính sự khác biệt giữa liên tục và rời rạc trong sự phân bố năng lượng này đã giải quyết hệ quả phi lí nói trên.

Cho bất kì một tần số sóng dao động ν của một vật thể vi mô và một năng lượng trung bình k_BT quy định bởi nhiệt độ T, ta chỉ cần N gói $h\nu$ là đủ đạt tới k_BT rồi, $Nh\nu \approx k_BT$, ν càng lớn thì N càng nhỏ và những gói từ $(N+1)$ $h\nu$ trở lên vì vượt quá k_BT nên bị khử mạnh khiến cho tổng năng lượng phóng xạ bởi vật đen trở thành hữu hạn. Điểm then chốt mà Planck giả định là một vật chỉ có thể tiếp nhận hay mất đi những gói năng lượng cơ bản $E = h\nu$. Dùng phổ bức xạ của vật đen đo đạc bởi các nhà thực nghiệm, năm 1900 Planck tìm ra $h \approx 6.55\times10^{-34}$ J.s. Đo đạc ngày nay cho kết quả $h \approx 6.626\times10^{-34}$ J.s $= 4.134\times10^{-15}$ eV.s, hằng số h từ đây là biểu trưng của vật lí lượng tử để miêu tả, giải thích các hiện tượng trong thế giới vi mô.

Albert Einstein là người đầu tiên dùng giả thuyết lượng tử ánh sáng $E = h\nu$ để diễn giải hiện tượng quang điện. Đặc tính nội tại không liên tục của

---

ra ngoài chân trời tối kín của nó, lỗ đen không hoàn toàn đen nữa. Lượng tử không còn là giả thuyết mà đã trở thành nguyên lí nền tảng của vật lí đương đại.

Tài liệu tham khảo:

Nguyễn Trọng Hiền, "Sự đo đạc hằng số Planck", *Kỉ Yếu Max Planck, Người khai sáng thuyết Lượng tử*, trang 203-234, Nxb Tri thức (2009).

lượng tử được Niels Bohr áp dụng để sáng tạo thuyết nguyên tử vì ông thấy phổ năng lượng của electron trong nguyên tử cũng rời rạc. Tiếp theo Louis de Broglie chỉ ra lưỡng tính sóng-hạt của mọi vật thể vi mô, bởi chúng cũng dao động như sóng ánh sáng, và cơ học lượng tử hình thành với nguyên lí bất định của Werner Heisenberg và phương trình sóng của Erwin Schrödinger. Lượng tử của Planck do đó không còn là giả thuyết nữa mà trở thành một trong vài nguyên lí nền tảng của vật lí và khoa học nói chung mà dấu ấn ngày càng in đậm trong sinh hoạt của con người: khởi đầu từ khoa học, công nghệ rồi lan rộng sang nhiều lĩnh vực khác nhau như triết học, nghệ thuật, văn chương. Hằng số Planck h trong $E = h\nu$ có gốc nguồn từ chữ *hilfe* (tiếng Đức là phụ trợ), chi tiết nói lên sự khiêm tốn của nhà bác học lớn.

Do tính toán qua hằng số rất nhỏ h, danh từ "vi mô" trong khoa học tự nhiên được hiểu như những vật chất kích thước bằng hay nhỏ hơn một phần tỉ mét, hay nano-mét. Như vậy một nhóm nguyên tử rộng dài khoảng nano-mét (kích thước một nguyên tử cỡ 1/10 nano-mét) có thể được coi như ngưỡng cửa bắt đầu đi sâu xuống thế giới vi mô trong đó bao gồm những hạt nhỏ hơn nữa như electron cùng proton và neutron.

Hằng số Planck h, vận tốc ánh sáng c và hằng số G của lực hấp dẫn Newton là ba hằng số cơ bản chi phối sự vận hành của vạn vật trong vũ trụ, từ đó mà mọi đơn vị vật lí đều có thể được tính toán ra.

IIb. Yukawa và lực hạt nhân mạnh

Máy siêu gia tốc LHC của CERN là máy phóng hai chùm hadron có gia tốc cực kì cao va chạm nhau với ưu tiên số một là săn lùng hạt Higgs. Vậy hadron là gì? Có nguồn gốc từ tiếng Hi Lạp *hadros* có nghĩa là mạnh, hadron là hạt bị chi phối bởi lực mạnh, hằng số tương tác của nó lớn hơn rất nhiều hằng số tương tác điện-từ $\alpha_{em} = e^2/\hbar c \approx 1/137$ với $\hbar = h/2\pi$. Ví dụ điển hình của hadron là hạt proton (p) mang điện tích dương $+e$ và hạt neutron (n) không có điện tích, chúng là hai thành phần chủ chốt gắn kết với nhau để tạo nên hạt nhân của các nguyên tử trong tự nhiên.

Đơn giản nhất là nguyên tử hydrogen gồm một electron dao động xung quanh một proton, hạt nhân của nguyên tử đó. Nguyên tử helium

có hai electron chuyển động xung quanh hạt nhân của nó bao gồm hai neutron và hai proton. Điều cần thiết để mọi nguyên tử được trung hòa điện tích, như ta thấy trong thiên nhiên, là số lượng electron phải bằng số lượng proton với hai ví dụ trên về nguyên tử hydrogen và helium.

Tất cả các hadron đều là những hợp tố cấu tạo bởi những thành phần sơ cấp hơn gọi là quark. Vậy hadron và quark là đặc trưng của lực hạt nhân mạnh, một trong bốn lực cơ bản của Tự nhiên, ba lực cơ bản khác là điện-từ, hạt nhân yếu và hấp dẫn.

Hai chùm hadron trong máy gia tốc khổng lồ LHC thực ra là hai chùm proton va chạm nhau cực mạnh để tạo ra những hạt mới như các quark nặng *s, c, b, t*; các boson chuẩn như W, Z; hạt Higgs để từ đó nghiên cứu và khám phá những lực chi phối sự vận hành của chúng.

1- *Hadron* (baryon, meson) và *Lepton*: Ngoài proton và neutron ra còn nhiều hadron khác đã được phát hiện, một số trong đó là các hạt có spin 1/2 như N^*, Λ^0, Σ, Ξ... gọi chung là baryon, tiếng Hi Lạp có nghĩa là nặng. Hadron gồm hai loại: baryon có spin 1/2 và meson có spin là số nguyên 0, 1. Quark là thành phần sơ cấp cấu tạo nên baryon nói riêng và hadron nói chung.

Lepton tiếng Hi lạp có nghĩa là *nhẹ* đối chọi với nặng như một cách để phân biệt giữa hai loại hạt cơ bản của vật chất là lepton và quark. Lepton thứ nhất là hạt electron e^- quen thuộc, hạt thứ hai là μ^- (muon) được khám phá năm 1936, hạt thứ ba là τ^- (tauon) được phát hiện năm 1975. Ba hạt e^-, μ^-, τ^- đều có điện tích âm -e, song hành cùng ba hạt neutrino ν_e, ν_μ, ν_τ trung hòa điện tích, 6 lepton này cùng với 6 quark *u, d, c, s, t, b* là 12 viên gạch cơ bản của vật chất đã được phác họa trong Hình 1 trong phần Nhập đề.

Ở giữa hạt nặng (baryon) và hạt nhẹ (lepton) là những hạt trung bình (meson), ví dụ điển hình là meson π hay pion. Sự hiện hữu của hạt pion vô hướng (spin 0) được tiên đoán năm 1935 bởi Hideki Yukawa (người Nhật đầu tiên đoạt giải Nobel năm 1949) theo đó lực gắn kết proton và neutron trong hạt nhân nguyên tử là do sự trao đổi meson π, hạt này có vai trò làm trung gian truyền tải lực mạnh cho proton và neutron tương tác gắn kết với nhau.

Sáng tạo của Yukawa khởi nguồn từ sự nhận thức sâu sắc về khái niệm *trường* (field) của hai lực cơ bản đã được biết đến từ lâu, đó là trường điện-từ

(diễn tả bởi phương trình Maxwell, người tổng hợp và bổ sung công trình mở đường của Ampère, Faraday...) và trường hấp dẫn (diễn tả bởi phương trình Einstein mở rộng định luật Newton). Điện tích di chuyển tạo nên trường điện-từ, phát tán ánh sáng và tác động đến các điện tích khác ở khắp nơi và mọi lúc. Cũng vậy, khối lượng tạo nên trường hấp dẫn thu hút vạn vật ở khắp nơi, mọi lúc. Vậy trường là nguyên nhân và cũng là trung gian để cho lực tác động lên mọi vật đặt ở một chỗ nào đó trong không gian và một lúc nào đó của thời gian, gọi chung là một không-thời gian. Trường là một thực thể tồn tại ở khắp mọi điểm của không-thời gian, khác với hạt chỉ xuất hiện ở một điểm chính xác của không-thời gian. Trong ngôn ngữ toán học, trường là một hàm số (mà biến số là bốn toạ độ không-thời gian), hàm số này tuân thủ một định luật vật lí diễn tả bởi một hay nhiều phương trình.

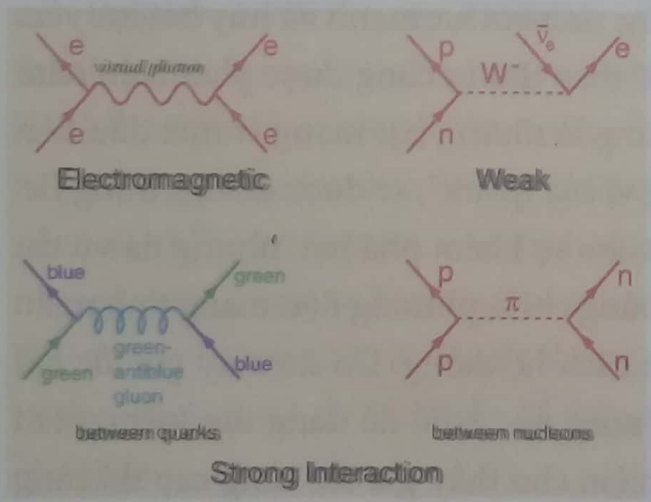
Đặc điểm của hai trường cổ điển điện-từ và hấp dẫn, theo thứ tự tuân thủ hai phương trình Maxwell và Einstein, là chúng biểu hiện dưới dạng sóng lan tỏa khắp không gian với vận tốc của ánh sáng. Nhưng khi hòa nhập với thế giới của lượng tử thì sóng và hạt tuy hai mà một, sóng điện-từ cũng xuất hiện dưới dạng hạt cưỡi sóng, gọi là photon, mà Einstein đã chứng minh qua hiện tượng quang điện. Ngược lại, Louis de Broglie với cái nhìn thông tuệ thấy hạt cũng dao động như sóng để thành trường lượng tử, điều này được chứng nghiệm sau đó bởi Clinton Davisson và Lester Germer với ứng dụng trực tiếp là sự phát minh ra kính hiển vi điện tử.

Điểm quan trọng nữa là giữa hai electron phải có sự trao đổi sóng điện-từ được "lượng tử hóa" dưới dạng hạt photon, hạt này làm trung gian truyền tải lực điện-từ để electron đẩy nhau. Cũng vậy, giữa hai khối lượng có sự trao đổi sóng hấp dẫn, thể hiện bởi hạt graviton, để chúng hút lẫn nhau. Dùng khái niệm này, Yukawa đi xa hơn và đưa ra giả thuyết là giữa hai nucleon (tên gọi chung cho proton và neutron) phải có sự trao đổi một hạt nào đó làm tác nhân cho lực mạnh gắn kết nucleon trong hạt nhân nguyên tử giúp cho vật chất bền vững. Hạt trung gian đơn giản nhất của lực mạnh mà Yukawa đề xuất là meson π vô hướng (spin 0), khác với photon của lực điện-từ có spin 1.

Không những tiên đoán phải hiện hữu hạt pion để truyền tải lực hạt nhân mạnh, ông còn ước tính được khối lượng của nó bằng cách mô phỏng

tĩnh điện học, theo đó sự trao đổi hạt photon giữa hai điện tích cho ta thế năng ~ e^2/R mà đạo hàm của nó là lực Coulomb ~ $-e^2/R^2$ quen thuộc, với R là khoảng cách giữa hai điện tích. Thực vậy, dùng phép biến đổi Fourier cho hàm truyền $1/\mathbf{k}^2$ của photon nối kết hai điện tích e, ($\mathbf{k}$ là vectơ xung lượng của photon trung gian, Hình 3 phía trái ở trên), ta tính được thế năng e^2/R của lực điện-từ mà de Coulomb năm 1785 đã đo lường và chứng nghiệm.

Cũng vậy, với g là hằng số tương tác pion-nucleon, m là khối lượng của meson π, ta có hàm truyền $1/(\mathbf{k}^2 + m^2c^2)$ của pion, hạt trung gian nối kết proton và neutron (Hình 3 phía phải ở dưới). Dùng phép biến đổi Fourier cho hàm truyền pion, Yukawa tính ra được thế năng ~ $g^2e^{-\lambda R}/R$ của lực mạnh, với $\lambda = mc/\hbar$. Trong hệ số λ ta thấy tác động của lượng tử qua hằng số h của Planck. Khi khối lượng của meson trung gian bằng 0 (trường hợp photon), lực Yukawa trở thành lực Coulomb ($m \to 0$, $e^{-\lambda R}/R \to 1/R$) chứng tỏ sự nhất quán của phép tính toán dùng hàm truyền của hạt trung gian (như photon, W, gluon, meson π) để tải lực. Vậy thế năng Coulomb là một trường hợp đặc biệt của thế năng Yukawa phổ quát.



Hình 3. Giản đồ Feynman
Phía trái ở trên: Photon truyền tải lực điện từ để electron tương tác (QED).
Phía phải ở trên: Phân rã $n \to p + e^- + \nu_e$, boson chuẩn W truyền tải lực yếu giữa nucleon (n, p) và lepton (electron, neutrino).
Phía trái ở dưới: gluon truyền tải lực mạnh để quark tương tác (QCD).
Phía phải ở dưới: meson π (gạch chấm) nối kết hai nucleon để diễn tả tương tác proton và neutron.
Richard Feynman là ngọn hải đăng của ngành vật lí hạt với các giản đồ (diagrams), hàm truyền (propagators), quy luật (rules) mang tên ông.

Khối lượng m của hạt trung gian (photon, meson π, hay bất kì hạt boson trung gian nào) cho ta hệ số hàm mũ $e^{-\lambda R}$ để xác định độ dài truyền tải R của lực: $R \sim 1/\lambda = \hbar/mc$, m càng lớn bao nhiêu thì tầm truyền R của lực

càng nhỏ bấy nhiêu, điều phù hợp với nguyên lí bất định Heisenberg R*mc* ~ *h*. Mối liên hệ giữa *m* và R được minh họa bởi lực điện-từ, photon không có khối lượng nên nó có thể truyền đi vô hạn ($m = 0 \leftrightarrow R = \infty$).

Biết độ dài tác động của lực mạnh R ~ 10^{-15} m do Ernest Rutherford trước kia đã đo lường kích thước của hạt nhân nguyên tử, Yukawa suy ra khối lượng của meson π là khoảng 140 MeV/c^2, nặng hơn electron gần ba trăm lần[3]. Kết quả quan trọng này về khối lượng có một điểm tương đồng với hiệu ứng Meissner, theo đó từ trường bị ngăn chặn trong các vật liệu siêu dẫn điện-từ[4], một đề tài liên quan mật thiết đến boson Higgs của lực yếu trong SM mà ta sẽ đề cập sau ở phần IVe.

2- Năm 1947, meson π được phát hiện bởi các tia vũ trụ, đó là các chùm hadron có năng lượng cực kì cao từ các thiên hà xa xôi bay đến và va chạm với những hạt nhân nguyên tử trong khí quyển bao quanh Trái Đất. Do tác động của lực mạnh, tia vũ trụ sản sinh ra meson π theo những quá trình: $p + p \rightarrow p + n + \pi^+$, $n + p \rightarrow p + p + \pi^-$, $p + p \rightarrow p + p + \pi^0$... Sau khi sinh ra bởi lực mạnh, meson π liền phân rã bởi lực yếu, ví dụ $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$ và lepton $\mu^\pm$ vừa sinh ra cũng lại phân rã thành các lepton nhẹ hơn $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e + \nu_\mu$, cứ thế tiếp nối vòng sinh hủy, sinh bởi lực mạnh và hủy bởi lực yếu.

Ngoài ra meson K và baryon Λ^0 theo thứ tự cũng được phát hiện năm 1947 và 1950 bởi các tia vũ trụ, chúng là những hạt mang *kì tính* đầu tiên được biết đến. Kì tính, một "hương vị của quark", sẽ được đề cập trong IIc. Tuy có năng lượng cao rất cần thiết cho sự khám phá hạt, nhưng tia vũ trụ lại tản mát khắp không gian nên chúng chỉ là phương tiện mang tính ngẫu nhiên và khó có thể khai thác một cách hệ thống. Do đó máy gia tốc hạt được xây dựng ở nhiều nơi từ Mĩ sang Âu, Á để dễ dàng tìm kiếm, phát hiện ra nhiều hạt mới lạ, kinh nghiệm cho thấy gia tốc càng cao thì càng

---

[3] Trong vật lí hạt, đơn vị của năng lượng *E* là electron-volt (eV), đó là năng lượng nhận được bởi một electron đặt trong một điện thế 1 volt, vậy 1eV = 1,6 10^{-19} Joule (J), các bội số của eV là MeV = 10^6 eV, GeV = 10^9 eV. Do $E = mc^2$ nên khối lượng có đơn vị là eV/c^2. Electron có khối lượng bằng 0,511MeV/ c^2 = 9.1 10^{-31} kg.

[4] Hàm mũ $e^{-\lambda R}$ nhắc nhở cách giải thích hiệu ứng Meissner với độ thấm sâu từ trường λ_L của hai anh em Fritz và Heinz London. Hạt boson ở đây là cặp Cooper của hai electron trong siêu dẫn điện từ.

khám phá ra nhiều hiện tượng bất ngờ. Máy gia tốc vô hình trung là biểu tượng của ngành vật lí hạt, không có những phương tiện ngày càng lớn này thì vật lí hạt khó phát triển thêm và thiên văn, vũ trụ học có thể trở lại vai trò nguyên thủy như một phòng thí nghiệm lớn mà thiên nhiên tặng con người nếu có thể khai thác hữu hiệu.

Vào thời điểm trước khi SM ra đời, vài trăm hadron như vậy được phát hiện bởi tia vũ trụ và máy gia tốc. Bản chất của chúng là gì, có tuân thủ một trật tự nào giống như sự sắp xếp các nguyên tố hoá học trong thiên nhiên với bảng tuần hoàn Mendeleev không?

Những câu hỏi mà sau này ta sẽ làm quen và giải đáp, theo đó hadron là phức hợp của quark (hay/và phản quark) gắn kết với nhau bởi gluon: baryon được cấu tạo bởi 3 quark còn meson là bởi quark gắn kết với phản quark. Đây là một thành tựu lớn vì chỉ bằng mấy viên gạch cơ bản mà ta xây dựng nên tất cả các hadron và diễn tả nhất quán những tính chất của chúng.

Phản hạt nói riêng và phản vật chất nói chung là khám phá kì diệu của Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984), một thiên tài tầm cỡ Albert Einstein. Điều ngẫu nhiên là cả hai đều 26 tuổi khi khám phá ra hai phương trình nền tảng của vật lí $E = mc^2$ và $(i\hbar\gamma^\mu\partial_\mu - mc)\Psi(x) = 0$ và đã nhanh chóng trở thành hệ hình của khoa học mà mọi phát triển sau này đều phải dựa vào. Khi kết hợp cơ học lượng tử với thuyết tương đối hẹp, Dirac đã sáng tạo ra phương trình chi phối sự vận hành của những viên gạch sơ cấp cấu tạo nên vật chất như lepton, quark và của tất cả các fermion phức hợp khác như proton, neutron, baryon. Tại sao phải kết hợp hai lí thuyết nêu trên? Bởi cơ học lượng tử là lí thuyết chung cho mọi vật thể vi mô, còn thuyết tương đối hẹp thì tối cần thiết để diễn tả chuyển động với vận tốc rất cao của chúng.

Phương trình[5] Dirac là bản giao hưởng tuyệt vời của sự kết hợp nói trên, nó mở ra hai chân trời mới lạ: thứ nhất là electron mang spin $\hbar/2$, một đặc trưng độc đáo của lượng tử, thứ hai là sự hiện hữu tất yếu của phản

---

[5] Phương trình Dirac $(i\hbar\gamma^\mu\partial_\mu - mc)\Psi(x) = 0$ có bốn ma trận 4×4 γ^μ ($\mu = 0,1,2,3$) gọi là ma trận Dirac, kèm theo bốn đạo hàm $\partial_\mu \equiv \partial/\partial x^\mu$ đối với bốn toạ độ không-thời gian $x^\mu \equiv (x^0 = ct, \mathbf{x})$, điều quen thuộc với thuyết tương đối.

electron (gọi là positron) nói riêng và của phản quark, phản hạt, phản vật chất nói chung[6]. Hạt và phản hạt có cùng khối lượng nhưng tất cả các đặc tính khác (spin, điện tích, sắc tích, hương vị) của chúng đều ngược dấu. Carl Anderson khám phá ra positron e^+ vào năm 1932.

3- Thời "tiền SM" khoảng trước năm 1950, duy nhất chỉ có QED là đã được hoàn tất, khởi đầu bởi Dirac và kết thúc bởi Richard Feynman, Julian Schwinger, Sin-Itero Tomonaga, Freeman Dyson. Đó là lí thuyết diễn tả tương tác điện-từ giữa các hạt mang điện tích. Lí thuyết hoàn chỉnh QED này kết hợp trường điện-từ cổ điển với tính lượng tử (qua các tính chất phi liên tục, xác suất và bất định của vật thể vi mô) để thành trường lượng tử photon. Cũng vậy hàm số sóng electron, nghiệm số của phương trình Dirac cũng được "lượng tử hóa lần thứ hai" để thành *trường lượng tử* electron diễn tả lưỡng tính sóng-hạt, phi liên tục, bất định trong đó electron, positron sinh hủy liên hồi. QED diễn tả sự biến hoá, sản sinh và hủy diệt của photon, lepton, phản lepton, tổng số những hạt này không cố định mà biến đổi, một đặc trưng tương tác của các trường lượng tử. Như vậy, lí thuyết trường lượng tử rất phù hợp với vật lí hạt cơ bản vì tính chất phong phú sóng-hạt của chúng với số lượng hạt và phản hạt sinh hủy và biến đổi không ngừng.

---

[6] Máy chụp hình nổi PET (Positron Emission Tomography) dùng trong y học ngày nay là một ứng dụng trực tiếp của positron, khi positron gặp electron có sẵn trong cơ thể người thì cặp positron-electron biến thành tia bức xạ cực kì tinh vi để rọi sáng mọi chi tiết.

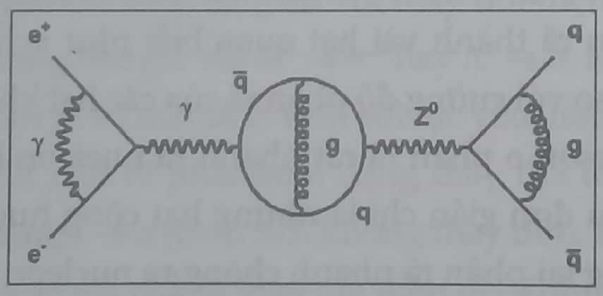
Trong cơ học cổ điển, một vật có xung lượng **P** quay xung quanh một trục đặt cách nó một đoạn dài **R** thì momen góc của vật là $\mathbf{L} = \mathbf{R} \times \mathbf{P}$. Mọi vật thể dù lớn như các hành tinh hay nhỏ như một electron, quark, photon đều có spin, một thuộc tính quay nội tại của vật, là momen góc của vật. Spin của photon cũng là lí do giúp chúng ta có thể xem được phim 3D.

Trong thế giới của lượng tử, ta hình dung hạt vi mô như một con quay với momen (hay xung lượng) góc nội tại, gọi là spin **J**. Độ dài của vectơ **L** (hay **J**) có thứ nguyên là ML^2T^{-1} với M, L, t theo thứ tự là khối lượng, chiều dài không gian và thời gian. Vì hằng số Planck $h = E/\nu$ có cùng thứ nguyên như $|\mathbf{J}|$, nên h là đơn vị của spin. Phương trình Dirac cho biết spin của electron bằng $\hbar/2 = h/4\pi$ tức là nó phải tự quay xung quanh mình hai vòng 4π mới trở lại trạng thái ban đầu. Vì mang điện tích và tự quay tròn xung quanh trục của nó nên electron có momen từ lưỡng cực để tác động giống như một chiếc kim la bàn nhỏ xíu. Spin mở ra một phạm trù mới cho vật lí hiện đại, nhánh "spin-điện tử" đã mang lại giải Nobel Vật lí 2007 cho Albert Fert và Peter Grünberg với hiệu ứng Từ trở Khổng lồ mà một trong nhiều ứng dụng là bộ nhớ MRAM cùng các đầu đọc, đầu ghi của đĩa cứng trong máy vi tính.

Thuyết QED có một khuôn khổ tính toán chặt chẽ và nhất quán gọi là phương pháp nhiễu loạn (perturbative method) bằng cách triển khai thành chuỗi các lũy thừa của hằng số tương tác điện từ $\alpha_{em} \approx 1/137$. Vì $\alpha_{em} << 1$ nên triển khai theo lũy thừa của α_{em} là chính đáng.

Mỗi đại lượng trong điện từ đều được trình bày như chuỗi $\sum_n \alpha^n_{em} A_n$ mà ta phải tính được những biên độ tương tác A_n, A_1 tương ứng với giản đồ cây (tree diagram) minh hoạ bởi Hình 3, A_n ($n \geq 2$) với những vòng kín (loop) minh họa bởi Hình 4.

Nhưng QED chỉ là tương tác điện-từ của lepton với photon thôi, còn hai tương tác mạnh và yếu của hadron và neutrino đòi hỏi một tiến trình khám phá gian nan nhưng kì thú trong sự khám phá các hạt quark, các boson chuẩn W, Z, gluon cũng như những định luật vận hành của chúng để cuối cùng ra đời SM, một bước nhảy vượt bậc của vật lí hạt cơ bản. Feynman, với các giản đồ và quy luật mang tên ông, thực sự là người dẫn đường cho sự phát triển của QED, thuyết này trở thành mẫu hình cho hai thuyết điện-yếu và QCD mô phỏng và thăng hoa.



Hình 4. Vài ví dụ về vòng kín lượng tử (quantum loop)

Phép tính nhiễu loạn khởi đầu bằng 0 vòng kín (0-loop) hay giản đồ cây minh hoạ bởi Hình 3, rồi tiếp tục bởi Hình 4: 1 vòng kín (one-loop) ở hai đầu bên trái (với photon γ) và bên phải (với gluon g), 2 vòng kín (two-loop) ở giữa.

IIc. Hương và Sắc của quark

Ngoài sắc tích đã biết (xem phần Nhập đề), quark cũng mang hương vị, lần nữa lại là một thuật ngữ riêng của vật lí hạt để chỉ định sự khác biệt giữa 2 loại quark *u*, *d* không hương vị của vật chất bền vững với 4 loại quark *s*, *c*, *b*, *t* có hương vị, chúng mang tên kì (*strange*), duyên (*charm*), đáy

(*bottom*), đỉnh (*top*), những đặc tính của một loạt vi hạt vật chất mới lạ, nặng và phân rã nhanh chóng, thời gian tồn tại trung bình khoảng giữa 10^{-10} và 10^{-13} giây, sự sản sinh ra chúng đòi hỏi máy gia tốc khổng lồ với năng lượng cực kì cao.

Trước hết, chúng ta thử tìm hiểu nguồn gốc của cái tên *kì*? Vào những năm 1950, trong những buồng sương Wilson dò tìm hạt, sự phát hiện những hạt mang tên V (vì từ một điểm chung có hai vết tách rời nhau tựa như chữ V) là điểm khởi đầu của một bước ngoặt quan trọng trong tiến trình phát triển vật lí hạt, từ đó khái niệm hương vị của vật chất ra đời, "mang hương cho quark". Được tạo ra bởi sự va chạm giữa các hadron trong tia vũ trụ hay trong máy gia tốc, những hạt V này có một tính chất lượng tử lạ lùng là bao giờ cũng ghép đôi, biểu hiện thành hai vết giống như chữ V khi được sản sinh bởi các tương tác mạnh của hạt nhân nguyên tử. Câu hỏi đầu tiên là tại sao hai hạt cặp đôi trong V lại dễ dàng được sinh ra ở cùng một điểm, trong khi một hạt duy nhất lại không được tạo ra, trái ngược với trải nghiệm bình thường?

Ngạc nhiên không kém là sau khi được sinh ra, mỗi nhánh trong cặp đôi của V lại phân rã thành vài hạt quen biết như π hay/và nucleon với cường độ rất nhỏ so với cường độ phân rã của các hạt khác (chẳng hạn như baryon N^* hay meson ρ phân rã rất nhanh ra nucleon hay π). Lí do là N^* (hay meson ρ) đều đơn giản chỉ là những hạt cộng hưởng do nucleon và π kết tụ nên chúng lại phân rã nhanh chóng ra nucleon (hay π) bởi lực hạt nhân mạnh, khác hẳn với hai nhánh của V bị phân rã rất chậm bởi lực hạt nhân yếu.

Phân tích kĩ lưỡng những hiện tượng này đưa tới kết luận là phải hiện hữu một tính chất lượng tử mới lạ nào đó mà sau này được gọi là hương vị của quark (và phản quark) để chúng cấu tạo nên cặp hadron và phản hadron như hai nhánh của V. Mỗi nhánh mang một đại lượng mới lạ đối lập nhau và luôn đi kèm nhau, tựa như photon của lực điện-từ sản sinh ra hai nhánh là cặp hạt và phản hạt của chính nó như cặp $e^- e^+$, $\mu^- \mu^+$ chứ không phải cặp $e^- \mu^+$ hay $\mu^- e^+$, vì như vậy không có sự bảo toàn số lượng electron hay số lượng muon. Murray Gell-Mann, giải Nobel 1969, gọi đại

lượng được bảo toàn bởi lực mạnh là *kì tính*[7], vì trước đó không ai biết đến vật chất mới lạ này mà chỉ thấy vật chất bình thường bền vững như nucleon được tạo nên bởi quark *u*, *d* không hương vị thôi.

Phản ứng $\pi^+ + n \to K^+ + \Lambda^0$ là một ví dụ về sự bảo toàn *kì tính* của lực hạt nhân mạnh. Khởi đầu từ hadron không hương vị là π^+ và n, chúng va chạm với nhau, sản sinh ra V gồm hai nhánh là K^+ và Λ^0. Mỗi nhánh phải mang *kì* tính s và $\bar{s}$ đối ngược nhau để chúng tự triệt tiêu và bảo toàn kì tính của hệ thống K^+ và Λ^0, trong Λ^0 có quark *s* và trong K^+ có phản quark $\bar{s}$.

Hạt V được phát hiện đầu tiên là cặp meson K^+, K^- hay cặp K^0, phản K^0; K^+ cấu tạo bởi cặp $\bar{s}\,u$, K^- bởi $\bar{u}\,s$, K^0 bởi $\bar{s}\,d$, phản K^0 bởi $\bar{d}\,s$. Baryon Λ^0 là do các tổ hợp của 3 quark *u*, *d*, *s* cấu tạo nên.

Sau khi được tạo ra, các hadron *kì tính* như K^+ và Λ^0 lại phân rã bởi lực yếu, lực này vi phạm *kì tính*: $K^+ \to \pi^0 + e^+ + \nu_e$, $K^+ \to \pi^+ + \pi^0$, $\Lambda^0 \to p + e^- + \bar{\nu}\,e$, $\Lambda^0 \to p + \pi^-$ là vài ví dụ của hadron phân rã bởi lực yếu vi phạm kì tính (trong các phản ứng trên, vế trái mang kì tính còn vế phải thì không). Các phân rã $K^+ \to \pi^0 + e^+ + \nu_e$ và $\Lambda^0 \to p + e^- + \bar{\nu}\,e$ cho thấy một điều quan trọng là dòng lực yếu chỉ biến chuyển với thay đổi điện tích như $K^+ \to \pi^0$ hay $\Lambda^0 \to p$, chứ không bao giờ với $K^+ \to \pi^+$ hay $\Lambda^0 \to n$. Khi lực mạnh tạo ra quark s, nó liền phân rã và mất đi kì tính bởi lực yếu, hơn nữa thực nghiệm trên cho biết kì tính mất đi phải dưới dạng thay đổi điện tích $s \to u$ mà không phải dưới dạng $s \to d$ (điện tích không thay đổi). Không có dòng lực yếu thay đổi hương vị mà chẳng thay đổi điện tích (như $s \to d$ chẳng hạn), sự triệt tiêu dòng lực yếu trung hòa điện tích $s \to d$ này chính là điểm khởi đầu của cơ chế GIM (Glashow, Iliopoulos, Maiani) đã tiên đoán sự hiện hữu của quark duyên mà ta sẽ đề cập sau ở Phần IVc.

Tóm lại lực hạt nhân mạnh bảo toàn hương vị của quark, trong khi lực hạt nhân yếu vi phạm hương vị của nó. Không những vi phạm hương vị, lực yếu còn vi phạm phép đối xứng trái-phải (đối xứng *P*), và phép đối

---

[7] Tựa như trong logic tin học, hai con số 1 và 0 diễn tả **có** và **không**, ta gán cho kì tính một "số lượng tử" $\underline{S}$, theo đó hạt không mang kì tính có $\underline{S} = 0$, hạt mang kì tính (như baryon Σ, baryon Λ^0, meson K^-) có $\underline{S} = -1$, phản hạt (như phản baryon Σ, phản baryon Λ^0, meson K^+) mang phản kì tính có $\underline{S} = +1$. Xem Hình 5.

xứng vật chất-phản vật chất (đối xứng *CP*) mà chúng ta sẽ đề cập ở Phần IV về thuyết điện-yếu.

Cho đến cuối những năm 1960, vài trăm hadron đã được phát hiện bởi thực nghiệm, khiến cho Enrico Fermi đã phải khôi hài: nếu tôi có thể nhớ hết tên những hạt, tôi có lẽ nên làm nhà thực vật học!

Ngoài các hadron bình thường không mang hương vị như meson π, ρ, ω... và baryon N^*, N^{**}... (đó là những cộng hưởng do nucleon và pion hợp tụ), còn có nhiều hadron khác mang *kì tính* như meson K và baryon Λ^0, Σ, Ξ...

Quan sát những đặc trưng của hadron (khối lượng, spin, các kiểu sản sinh và phân rã) để tìm ra những quy luật chi phối chúng một cách định tính và sắp xếp chúng một cách có hệ thống theo từng nhóm bội (xem Hình 5), năm 1953 Murray Gell-Mann, cùng lúc với Kazuhiko Nishijima và đồng nghiệp Tadao Nakano đã tìm ra một đẳng thức mang tên GNN (Gell-Mann-Nakano-Nishijima) nối kết ba đại lượng Q, I_z, Y của hadron, với Q là điện tích (tính theo đơn vị điện tích $+e$), I_z là thành phần chiếu xuống trục z của vectơ spin đồng vị[8] **I** và Y là siêu tích[9]. Đó là:

---

[8] Hai hạt proton và neutron tuy khác nhau về điện tích nhưng vận hành như hệt nhau dưới tác động của lực mạnh, chúng được coi như hai thành phần của một hạt duy nhất là nucleon. Để diễn tả tính chất của lực mạnh không phụ thuộc vào điện tích (ở đây là nucleon), Heisenberg đưa ra khái niệm spin đồng vị để sắp xếp những hadron chia sẻ vài đặc tính chung thành từng nhóm bội (multiplet), theo đó nếu N hạt có chung vài đặc tính thì spin đồng vị **I** của chúng là $N = 2\,|\mathbf{I}| + 1$, vậy spin đồng vị của nucleon là 1/2, của pion là 1 (vì có 3 pion π^+, π^-, π^0). Tựa như một fermion mang spin 1/2 có hai thành phần $+1/2$ và $-1/2$ chiếu lên vectơ xung lượng **k** của nó, thành phần chiếu lên trục Oz của vectơ spin đồng vị là I_z, với I_z của proton là $+1/2$ và I_z của neutron là $-1/2$.
Một cách tổng quát thì spin đồng vị **I** có $(2I + 1)$ thành phần I_z, cũng như xung lượng góc **L** có $(2L + 1)$ thành phần L_z và spin **J** có $(2J + 1)$ thành phần J_z, sự tương đồng về cấu trúc của **I** và **J** khiến Heisenberg gọi **I** là spin đồng vị. Hệ thống meson K^+ và K^0 có spin đồng vị là 1/2, I_z của K^+ là $+1/2$, của K^0 là $-1/2$, I_z của π^+ là $+1$, của π^- là -1, của π^0 là 0.

[9] *Siêu tích* là khái niệm mở rộng *kì tính S* (hay *duyên* tính *C* hay *đáy* tính *B*, nói chung là hương vị của quark) để có thể áp dụng cho cả hai trường hợp baryon lẫn meson. Trước hết ta cần biết rằng trong các phản ứng chi phối bởi cả ba lực mạnh, yếu, điện-từ, số lượng baryon bao giờ cũng được bảo toàn, trong khi số lượng meson thì không, nó có thể biến đổi. Thực vậy trong các phản ứng (viết tắt $A \to B$) nếu ở A có baryon thì trong B cũng có baryon tuy có thể không cùng loại, ví dụ $\pi + p \to n + \rho + 3\pi$ hay $\pi + p \to \Lambda + K$. Ta thấy rõ baryon (p, n, Λ) bao giờ cũng có trong cả hai vế (đầu vào A và đầu ra B), còn meson như π, ρ, K thì không. Cũng như số lượng baryon, số lượng lepton cũng được bảo toàn trong các phản ứng của hai lực yếu và điện-từ, lepton không bị chi phối bởi lực mạnh. Tựa như kì tính với hai con số 1 và 0 diễn tả **có** và **không có** kì tính, sự bảo toàn baryon được diễn tả bởi "số lượng

$$Q = I_z + Y/2 \text{ (công thức GNN)}$$

Ý tưởng cốt lõi trong GNN là phải có một số lượng tử mới lạ nào đó (gọi là siêu tích Y) được bảo toàn trong sự sản sinh hadron (cả baryon lẫn meson) bởi lực hạt nhân mạnh, nhưng khi hadron phân rã bởi lực hạt nhân yếu thì Y không còn được bảo toàn nữa mà bị vi phạm. Vậy ngoài Y ra, phải bổ sung thêm một thành phần nào khác của hadron để diễn tả đồng loạt hai hiện tượng (bảo toàn và vi phạm) trái ngược này. Thành phần bổ khuyết đó gọi là spin đồng vị (kí hiệu I_z) được bảo toàn bởi lực mạnh nhưng cũng bị vi phạm bởi lực yếu, hai đại lượng Y và I_z này gắn bó mật thiết với nhau như một quy luật chi phối cả ba lực điện-từ, mạnh và yếu. Khi Y thay đổi một đơn vị thì I_z thay đổi nửa đơn vị $\pm$ 1/2 để làm sao cho tổng số của chúng lại chính là điện tích Q, một đại lượng bất biến của điện-từ.

Bề ngoài có vẻ giản đơn nhưng do tính phổ quát của công thức GNN đối với các hạt (hadron, quark, lepton), các lực tương tác (mạnh, yếu, điện-từ) và các phép đối xứng, nó là kim chỉ nam định hướng sau này cho cấu trúc của hai lực yếu và điện-từ trong sự thống nhất chúng thành thuyết điện-yếu, hai lực đều có $I \neq 0$ (bởi I_z) và $I = 0$ (bởi Y).

Đẳng thức GNN còn được dùng để tìm ra điện tích của quark. Thực thế, vì phải cần 3 quark gắn kết với nhau để tạo thành baryon, nên "số baryon" $\underline{b}$ của quark là 1/3 (chú thích 9), do đó:

u ($I_z = 1/2$, $Y = 1/3$), d ($I_z = -1/2$, $Y = 1/3$), s ($I_z = 0$, $Y = 2/3$)

c ($I_z = 0$, $Y = 4/3$), b ($I_z = 0$, $Y = -2/3$), t ($I_z = 0$, $Y = 4/3$)

từ đấy ta tính được điện tích $+(2/3)e$ cho 3 quark u, c, t và $-(1/3)e$ cho 3 quark d, s, b.

Việc phát hiện ra hương vị *kì tính* của vật chất bởi lực mạnh đã mở đường cho lực yếu phát triển và đưa đến hệ quả tuyệt vời là sự hiện hữu tất yếu của ba hương vị mới lạ của vật chất, đó là: duyên, đáy và đỉnh mà sau đó được thực nghiệm kiểm chứng thành công. Meson K^0 đóng vai

---

tử baryon $\underline{b}$", baryon có $\underline{b} = 1$, còn meson có $\underline{b} = 0$. Siêu tích được định nghĩa như $Y = \underline{b} + S$ (hay $\underline{b} + C$, $\underline{b} + B$). Vì kì tính $S = -1$ nên siêu tích của baryon mang kì tính là $Y = 0$ còn siêu tích của meson mang kì tính là $Y = -1$. Vì 3 quark cấu tạo nên baryon, vậy quark có $\underline{b} = 1/3$.

trò quan trọng trong mối liên hệ hữu cơ giữa hai lực mạnh và yếu đưa đến sự tiên đoán này. Quark duyên được tiên đoán bởi Sheldon Glashow, John Iliopoulos và Luciano Maiani (cơ chế GIM), hai quark đáy và đỉnh bởi Makoto Kobayashi và Toshihide Maskawa (cơ chế KM, diễn tả sự bất đối xứng giữa vật chất và phản vật chất).

Không những tiên đoán ba hương vị mới lạ của vật chất mà ngay cả khối lượng của các quark duyên và đỉnh cũng được ước lượng chính xác bởi những tính toán phức tạp các vòng kín lượng tử, soi đường cho thực nghiệm dò tìm và đo lường tính chất của chúng. Phép tính toán những vòng kín này (minh họa trong Hình 4) được xây dựng bởi Gerardus 't Hooft và người thầy hướng dẫn luận án tiến sĩ của ông là Martinus Veltman. Công trình của hai ông là chứng minh thuyết điện-yếu của Sheldon Glashow, Abdus Salam và Steven Weinberg cũng được hoàn chỉnh như QED, nghĩa là cũng như lực điện-từ, lực yếu có thể tái chuẩn hóa[10] (renormalization)

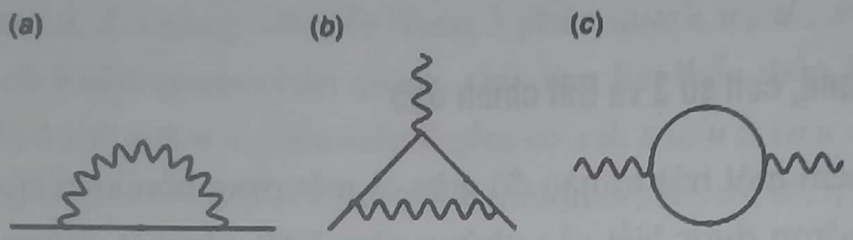
---

[10] Tái chuẩn hóa là phương pháp giải quyết nhất quán và chặt chẽ theo nghĩa toán học những con số vô hạn mà ta gặp khi tính toán. Một ví dụ của vô hạn là lấy tích phân một số vòng kín nào đó của giản đồ Feynman (xem Hình 4); tuy nhiên chỉ có một số nhỏ vòng kín là phân kì. Tái chuẩn hóa hàm ý là tách những đại lượng vô hạn đó ra khỏi cái hữu hạn bằng cách định nghĩa, sắp xếp chúng một cách nhất quán và có hệ thống. Vô hạn không biến mất mà chỉ bị tách biệt.

(i)- Những con số vô hạn nói trên phản ánh thuyết tương đối, mọi vật cách nhau không thể tương tác tức thì; để thỏa mãn điều kiện này thì các trường lượng tử ở hai điểm khác nhau y và z của không-thời gian phải tương tác ở một điểm chung gọi là tương tác định xứ (khoảng cách $x = y - z \to 0$). Nhưng với nguyên lí bất định, khoảng cách $x \to 0$ đưa đến năng lượng $E \to \infty$, vậy không ngạc nhiên khi ta có những kết quả phân kì. Ngay trong cơ học cổ điển, năng lượng tự tại (self energy) của hạt điểm không có kích thước cũng vô hạn, được minh hoạ bởi thế năng Coulomb $1/R$ của lực điện từ, hay thế năng Yukawa $e^{-\lambda R}/R$ của lực mạnh khi $R \to 0$.

(ii)- Đặc tính phong phú của QED nói riêng (và của các tương tác khác như QCD và điện-yếu nói chung) là các trường lượng tử (ví dụ hai trường electron và photon) không thể tự tồn tại riêng biệt mà phải dựa vào nhau, tương tác với nhau, chúng không có tự tính mà phụ thuộc lẫn nhau (interdependent), electron được xác định bởi photon và ngược lại photon bởi electron, chúng chỉ hiện hữu trong sự tương tác, chằng chịt với nhau. Như vậy khối lượng m_0 và điện tích e_0 của electron **"trần trụi"** (không tương tác với môi trường xung quanh) không thể xác định được vì electron không sao tách biệt khỏi photon. Cũng vậy khối lượng trần trụi của photon không thể xác định được vì tự nó luôn bị ràng buộc bởi các cặp vật chất-phản vật chất như electron-positron, trừ phi ngay từ đầu ta cho nó phải bằng 0 qua một tiên đề nào đó (đối xứng chuẩn).

và từ đó thuyết điện-yếu thăng hoa vì có một khuôn khổ tính toán hoàn hảo, chặt chẽ và nhất quán như QED. Hiếm thấy ngành khoa học nào có



(iii)- Nhưng nếu tạm lấy e_0, m_0 để tính toán (lấy tích phân những vòng kín lượng tử) một đại lượng vật lí Φ nào đó (như momen từ của electron chẳng hạn) thì có thể cho kết quả nghịch lí là đại lượng đó phân kì. $\Phi(e_0, m_0, \Lambda)$ là một hàm số của các đại lượng e_0, m_0 và một thông số Λ diễn tả sự phân kì của Φ.

Mặt khác, ta biết là electron lúc nào cũng được bao quanh bởi photon, còn photon bởi các cặp electron-positron, minh hoạ bởi các vòng lượng tử (a), (b), (c); vậy những đại lượng trần trụi m_0, e_0 của electron và khối lượng photon ω cũng phải thay đổi theo thứ tự thành δm (hình a), Z_e (hình b), $\delta\omega$ (hình c). Khi tính toán δm, Z_e, $\delta\omega$ một lần nữa, ta gặp những con số vô hạn. Cũng như Φ, các δm, Z_e, $\delta\omega$ đều là hàm số của e_0, m_0, Λ. Phân kì không ở trong bản chất của electron cũng như của lực điện từ tác động lên nó, mà do giả thuyết electron trần trụi.

(iv)- Có 2 loại đại lượng: loại không thể xác định (có thể vô hạn) như e_0, m_0 và loại phân kì δm, Z_e, và $\delta\omega$. Tái chuẩn hoá điện tích và khối lượng của electron là ghép cái vô hạn (Z_e, δm) và cái không thể xác định (e_0, m_0) vào điện tích e, khối lượng m của electron mà các nhà thực nghiệm đo lường, e và m dĩ nhiên đều hữu hạn.

Điều kì diệu của tái chuẩn hóa mà Feynman, Schwinger, Tomonaga (giải Nobel 1965) và Dyson chứng minh được là khi ta thay $e_0 Z_e = e$, $m_0 + \delta m = m$ và trong hàm $\delta\omega(e_0, m_0, \Lambda)$ thay thế e_0, m_0 bằng e, m rồi ấn định khối lượng của photon bằng 0, thì $\Phi(e_0, m_0, \Lambda)$ trở thành một hàm mới $\Phi_R(e, m)$ hữu hạn, không phụ thuộc vào thông số $\Lambda \to \infty$. Hai đại lượng có thể đều vô hạn nhưng khi ghép hợp sắp xếp chúng (hay hiệu số) có thể hữu hạn, đó là ý nghĩa vật lí của tái chuẩn hóa; electron tự do không tương tác và electron trong nguyên tử tương tác với hạt nhân, năng lượng tự tại của hai loại electron đó đều vô hạn nhưng năng lượng của electron mà ta đo lường thì hữu hạn.

Tomonaga gọi tái chuẩn hóa là "nguyên lí từ bỏ" một thuật ngữ thấm đượm tinh thần phương Đông với hàm ý khiêm tốn chấp nhận có cái bất khả tư nghị, có cái tính toán được. Sự tách biệt (nhất quán và chính xác theo nghĩa toán học) giữa hai cái vô hạn và hữu hạn được gọi là tái chuẩn hóa. Tuy nhiên phải thừa nhận rằng nó chỉ là phương pháp phân tích và giải quyết vấn đề phân kì của các lí thuyết trường lượng tử trong bối cảnh của phép tính nhiễu loạn.

(v)- Vòng kín lượng tử rất quan trọng vì trong $\sum_n \alpha^n_{em} A_n$, có nhiều quá trình và đại lượng vật lí quan trọng chỉ có thể phát hiện bởi vòng kín lượng tử. Cấu trúc siêu tinh vi của nguyên tử Hydrogen và momen-từ lưỡng cực dị thường của electron là hai ví dụ. Sự tiên đoán (cơ chế GIM) ra hương vị duyên bằng quá trình vòng kín lượng tử liên quan tới meson K là ví dụ thứ ba.

(vi)- Một tương tác "tái chuẩn hóa được" (renormalizable) nếu những đại lượng phân kì chỉ giới hạn trong một vài con số, ví dụ QED chỉ có hai con số vô hạn khi tính toán những vòng lượng tử với bất kì cấp bậc n nào, hai con số đó là sự thay đổi khối lượng δm và sự thay đổi điện tích Z_e của electron bởi photon. Trong các tương tác "tái chuẩn hóa được", một hệ quả tích cực của đối xứng chuẩn là tính phân kì thường chỉ nhẹ như Log(E) chứ không mạnh như lũy thừa E^n, khi $E \to \infty$.

ba giải Nobel chỉ với luận án tiến sĩ: 't Hooft chứng minh sự tái chuẩn hóa của điện-yếu, Politzer và Wilczek với đặc tính "tự do tiệm cận" (asymptotic freedom) của quark và gluon trong QCD. Điện-yếu và QCD là hai trụ cột xây dựng nên SM của vật lí hạt.

IId. Gell-Mann, con số 3 và Bát chính đạo

Tìm kiếm một trật tự nào đó giữa cả một rừng hỗn loạn của vài trăm các loại hadron được biết vào những năm 1960, xếp đặt chúng một cách tuần tự và hệ thống là mục tiêu phải giải quyết trước tiên để đi xa hơn nữa. Khởi đầu cuộc hành trình là ý tưởng của Enrico Fermi với các hạt không hương vị (quark *u, d* theo ngôn ngữ thời nay), theo đó meson π là hợp tố của nucleon và phản nucleon, rồi đến Shoichi Sakata mở rộng sang các hạt có kì tính trong đó 3 baryon p, n và Λ^0 đóng vai trò chủ động để cấu tạo nên các hadron có (và không có) kì tính. Ví dụ π^+ cấu tạo bởi $\bar{n}$ p, K^- bởi $\bar{p}$ Λ^0, nhưng Sakata chỉ giới hạn ở phạm vi meson còn đối với những baryon khác như $\Sigma^{\pm}$, Σ^0, Ξ^-, Ξ^0 thì mô hình Sakata bó tay vì không thể cấu tạo chúng một cách trực tiếp bởi 3 baryon p, n, Λ^0 mà phải kết hợp với meson π và K để tạo thành, ví dụ $\Sigma^+ \equiv \Lambda^0\pi^+$, $\Xi^- \equiv \Lambda^0 K^-$...

Bổ sung khuyết điểm và mở rộng ý tưởng của Sakata, Gell-Mann nhận thấy là giữa các hadron (cả meson lẫn baryon) có một phép đối xứng ngự trị chúng, đó là nhóm đối xứng unita SU(3) của 3 vật thể (quark) bề ngoài tương tự như 3 baryon p, n, Λ^0 nhưng hoàn toàn khác về bản chất.

Chỉ cần 3 viên gạch cơ bản của vật chất mà Gell-Mann gọi là 3 quark[11] *u, d, s* cùng với 3 phản quark $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$ để cấu tạo nên tất cả các meson và baryon được biết đến trước năm 1974, sắp xếp chúng theo

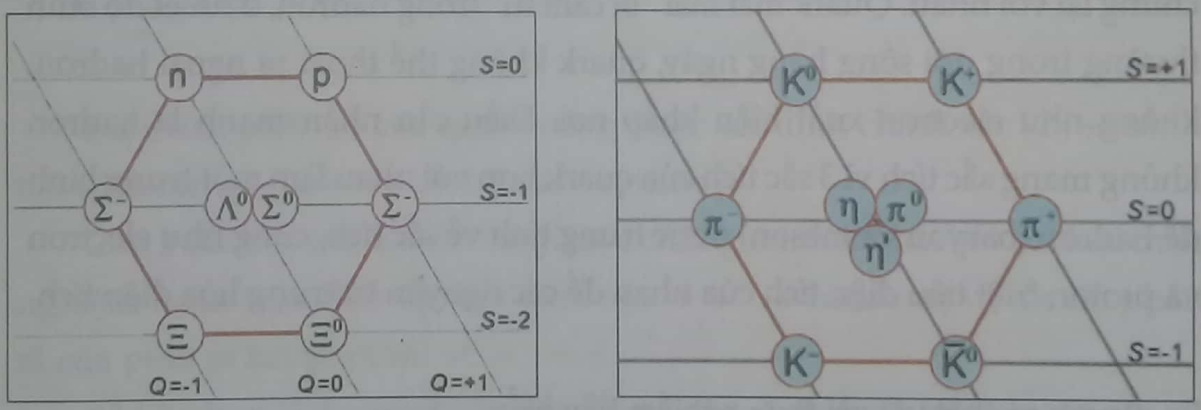
---

[11] Chữ "quark" theo sau con số 3 của câu "3 quark cho Muster Mark" trong truyện *Finnegans Wake* của James Joyce gợi cho Gell-Mann dùng chữ quark lạ lùng này để đặt tên cho 3 loại vi hạt cơ bản *u, d, s* tạo nên các hadron được biết đến vào những năm 1960. George Zweig, môn đệ của Feynman, cũng đồng thời năm 1964 đưa ra ý tưởng về viên gạch cơ bản có điện tích phân số, nhưng Zweig lại đặt tên là *ace*, còn trước khi nhớ lại truyện *Finnegans Wake* thì Gell-Mann gọi chúng là *kwork*. Nếu Gell-Mann biết là có 6 loại vi hạt cơ bản *u, d, s, c, t, b* của vật chất, chứ không phải chỉ có 3 loại *u, d, s* thì chắc ông đã chẳng dùng tên quark.

một trình tự nhất quán, đưa ra nhiều tiên đoán mà điển hình là baryon Ω^- với khối lượng được ước tính chính xác, trước khi thực nghiệm khám phá ra.

Vì meson cấu tạo bởi quark và phản quark, chúng là tổ hợp của một trong 3 quark *u*, *d*, *s* ghép với một trong 3 phản quark $\bar{u}$, $\bar{d}$, $\bar{s}$, như vậy tổng cộng có 9 cặp quark-phản quark, chia làm hai biểu diễn **8** và **1** của nhóm SU(3): $\mathbf{3 \times 3^* = 8 + 1}$. Biểu diễn **8** gồm có $\bar{s}\,d$, $\bar{s}\,u$, $\bar{u}\,d$, $(\bar{u}\,u - \bar{d}\,d)$, $(\bar{u}\,u + \bar{d}\,d - 2\bar{s}\,s)$, $\bar{d}\,u$, $\bar{d}\,s$, $\bar{u}\,s$ theo thứ tự là 8 meson K^0, K^+, π^-, π^0, η^0, π^+, phản K^0, K^- trong Hình 5.

Còn baryon là hợp tố của 3 quark $q_i q_j q_k$ với i, j, k là bất kì một trong 3 hương vị *u*, *d*, *s*, vậy tất cả có $3^3 = 27$ bộ ba: $\mathbf{3 \times 3 \times 3 = 8 + 8 + 10 + 1}$. Trong biểu diễn **8** ta nhận ra 8 baryon của Hình 5: n, p, Λ^0, $\Sigma^\pm$, Σ^0, Ξ^-, Ξ^0, ví dụ $\Sigma^+ \equiv uus$, $\Xi^- \equiv sds$ (so sánh với mô hình Sakata $\Sigma^+ \equiv \Lambda^0\pi^+$, $\Xi^- \equiv \Lambda^0 K^-$ ta sẽ thấy rõ sự khác biệt), trong biểu diễn **10** có baryon $\Omega^- \equiv sss$ mang spin 3/2, được tiên đoán bởi Gell-Mann.



Hình 5. Nhóm bội hadron (meson và baryon) được sắp xếp cân đối trên hình 8 cạnh đều đặn theo toạ độ I_z (trục ngang) và Y (trục thẳng đứng) gặp nhau ở trung tâm (π^0 và Λ^0). Ba đại lượng Q, I_z và Y của những hadron tuân thủ đẳng thức GNN. Gell-Mann gọi cách xếp đặt nhóm bội hadron theo hình 8 cạnh đều đặn là Bát chính đạo, mượn chữ nhà Phật.

Ngoài ra còn thêm một số 3 nữa, nhưng không phải là 3 hương vị *u*, *d*, *s* của quark mà là 3 sắc tích đỏ, xanh, lam được sử dụng để khám phá ra định luật cơ bản chi phối sự vận hành của quark, đó là QCD mà Gell-Mann cũng góp phần sáng tạo ra. Nhóm $SU(3)_C$ dùng trong QCD là nhóm đối xứng

giữa 3 sắc tích, cần phân biệt với nhóm đối xứng $SU(3)_F$ giữa 3 hương vị *u*, *d*, *s* mà biểu diễn 8 của nó là hai hình bát giác (xem Hình 5).

Lực mạnh QCD có một đặc trưng độc đáo mà các lực khác không có, đó là tính chất "tự do tiệm cận", theo đó ở nhiệt độ cao (năng lượng *E* lớn) quark và gluon không gắn bó với nhau nữa mà được tự do, hằng số tương tác α_{QCD} của chúng nhỏ dần như 1/Log(*E*) khi *E* tăng. Tự do tiệm cận của QCD cho phép ta dùng phương pháp nhiễu loạn như QED để triển khai thành chuỗi các lũy thừa của $\alpha_{QCD} \to 0$.

Ngược lại, ở nhiệt độ bình thường (*E* nhỏ), quark và gluon bị giữ chặt trong các hadron. Tính chất lạ lùng và độc đáo này, được gọi là nô lệ hồng ngoại (infrared slavery), là hệ quả của sự kéo dài liên tục từ *E* lớn xuống *E* nhỏ của 1/Log(*E*), hàm này tăng khi *E* giảm và như vậy làm cho $\alpha_{QCD} >> 1$.

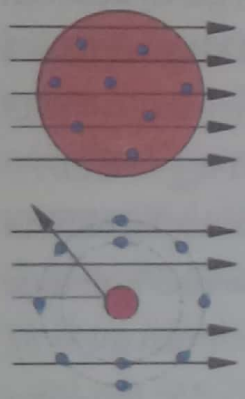
Vì *E* và độ dài *R* tỉ lệ nghịch với nhau theo nguyên lí bất định $E \times R \sim h$ (xem phần IIb) nên hệ quả của "nô lệ hồng ngoại" là cường độ của lực mạnh gắn kết quark tăng lên cùng khoảng cách *R* của quark, càng đẩy chúng ra xa để tách rời chúng thì lực gắn kết chúng lại càng mạnh hơn để kéo giữ chúng lại với nhau. Quark mãi mãi "bị cầm tù" trong hadron, ở nhiệt độ bình thường trong đời sống hằng ngày, quark không thể thoát ra ngoài hadron, không như electron xuất hiện khắp nơi. Điều cần nhấn mạnh là hadron không mang sắc tích vì 3 sắc tích của quark hợp với nhau làm một trung bình để hadron (baryon và meson) được trung tính về sắc tích, cũng như electron và proton triệt tiêu điện tích của nhau để các nguyên tử trung hòa điện tích.

IIe. Quark có thật với vài thực nghiệm tiêu biểu

Tuy không xuất hiện trực tiếp như lepton hay boson chuẩn nhưng sự tồn tại của quark và gluon rất rõ ràng trong nhiều thực nghiệm độc lập và tính chất của chúng được nghiệm chứng chính xác. Việc truy tìm quark, thành phần sơ đẳng cấu tạo nên hadron, cũng tương tự như quá trình khám phá ra proton trong hạt nhân nguyên tử của Rutherford năm 1911. Khi bắn chùm nguyên tử Helium (tia alpha) vào một phiến vàng mỏng, một phần chùm alpha quay ngược trở lại (tán xạ với góc lớn hơn 90°), Rutherford suy

ra là hạt nhân nguyên tử phải chứa một cái gì đó rất nhỏ và cứng mang điện tích dương nằm ở trung điểm, đó chính là hạt proton. Quark cũng được phát hiện như vậy khi người ta cho chùm electron đập mạnh vào nucleon và thấy xuất hiện đến bất ngờ nhiều tán xạ với góc rất lớn (xem Hình 6).

Khi phân tích chi tiết các số liệu thực nghiệm về phân bố tán xạ ở năng lượng cao, điều ngạc nhiên trái ngược với trực giác thông thường là các thành phần cơ bản (quark và gluon) cấu tạo nên nucleon lại hầu như không chút nào bị gắn kết chặt chẽ mà dao động tự do trong nucleon. Tính chất tự do tiệm cận của QCD giải thích cho hiện tượng này vì ở năng lượng cao thì hằng số tương tác $\alpha_{QCD} \to 0$, quark không bị giữ chặt trong hadron.



Hình 6. Phía trên: nếu nguyên tử có electron và hạt nhân tản mác khắp nơi thì chùm tia alpha bắn vào sẽ đi thẳng không bị quay ngược trở lại. Phía dưới: vì nguyên tử có một hạt nhân rất cứng và nặng nằm ở trung tâm, một phần chùm alpha bắn vào sẽ bị quay ngược trở lại với góc lớn hơn 90°.

Điện tích phân số của quark cũng được xác định chính xác khi so sánh tiết diện tán xạ của electron và của neutrino[12].

Còn 3 sắc tích của quark cũng được chứng minh ít nhất bởi hai loại thực nghiệm hoàn toàn độc lập: tiết diện $\sigma(e^- + e^+ \to \text{hadrons})$ và tốc độ phân rã của pion ra hai photon: $\pi^0 \to \gamma + \gamma$.

• Vì hadron là do quark cấu tạo nên, do đó sự sản sinh hadron bởi $e^- + e^+ \to$ hadron cũng tương đương như $e^- + e^+ \to \sum_j \bar{q}_j + q_j$ với tổng cộng 6 hương vị (u, d, s, c, b, t) của quark q_j và phản quark $\bar{q}_j$, chúng đều được tạo ra từ photon. Thực vậy, khi e^- và phản hạt của nó e^+ tụ hội, chúng tự hủy để biến thành năng lượng thuần khiết tượng trưng bởi photon ảo γ^* với khối lượng Ŝ

[12] Tài liệu tham khảo:
Jerome Friedman, "Con đường dẫn tới giải Nobel", *Kỉ Yếu Max Planck, Người khai sáng thuyết Lượng tử*, trang 163-172, Nxb Tri thức (2009).

$\neq 0$ và bằng tổng năng lượng của e^- và e^+. Khối lượng $\hat{S}$ của photon ảo này lại sinh ra các cặp vật chất-phản vật chất, tượng trưng bởi các cặp quark.

Khi so sánh $e^- + e^+ \to \gamma^* \to \sum_j (\bar{q}_j + q_j)$ với $e^- + e^+ \to \gamma^* \to \mu^- + \mu^+$, ta nhận thấy vì $\mu^\pm$ không có sắc tích và điện tích của muon cũng khác quark, nên tỉ số r giữa $\sigma(e^- + e^+ \to \text{hadrons})$ và $\sigma(e^- + e^+ \to \mu^- + \mu^+)$ chính là $r = N_c \sum_j Q_j^2$, với N_c là số lượng của sắc tích ($N_c = 3$) và Q_j là điện tích của quark j (theo đơn vị $+e$).

Nếu tổng năng lượng $\hat{S}$ của cặp $e^- + e^+$ (cũng là của cặp quark $q_j \bar{q}_j$ được tạo ra) ở dưới ngưỡng khối lượng của cặp quark duyên, thì $r = 3\{(2/3)^2 + 2(-1/3)^2\} = 2$. Nếu $\hat{S}$ vượt qua khối lượng của cặp quark duyên thì $r = 3\{2(2/3)^2 + 2(-1/3)^2\} = 10/3$, quá ngưỡng của quark đáy thì $r = 11/3$, tất cả các kết quả trên đều được thực nghiệm kiểm chứng chính xác. Trên nguyên tắc, giá trị tiệm cận của r là $r \to 5$ khi $\hat{S}$ vượt quá khối lượng của cặp quark đỉnh. Đóng góp của 1 vòng kín lượng tử trong QCD cho kết quả $r = N_c \sum_j Q_j^2 \{1 + \alpha_s/\pi\}$ với $\alpha_s \approx 0.15$ là hằng số tương tác của QCD, so với hằng số tương tác điện-từ $\alpha_{em} \approx 1/137$.

• Tốc độ phân rã của $\pi^0 \to \gamma + \gamma$ khi được tính bằng vòng kín lượng tử hình tam giác theo quy trình $\pi^0 \equiv (\bar{u}u - \bar{d}d) \to \gamma + \gamma$ sẽ cho ta kết quả nhỏ hơn thực nghiệm 9 lần nếu quên không tính đến bình phương của hệ số sắc tích ($N_c = 3$).

Không thể là ngẫu nhiên khi hai thực nghiệm hoàn toàn độc lập cùng đưa đến một kết luận chung là quark phải có $N_c = 3$ sắc tích.

PHẦN III. SẮC ĐỘNG HỌC LƯỢNG TỬ

Chúng tôi, những nhà vật lí hạt, thực sự không mấy quan tâm đến hạt mà chú trọng đến những nguyên lí cơ bản, chúng tôi dùng hạt như những công cụ để tìm hiểu những nguyên tắc nền tảng tiềm ẩn trong đó.

Steven Weinberg

Như đã nói ở phần Nhập đề, định luật diễn tả lực mạnh gắn kết các hạt cơ bản quark được gọi là *Sắc động học lượng tử* (QCD). Thuật ngữ sắc (sắc tích) trong QCD mượn chữ điện (điện tích) trong QED.

Thời "tiền SM" vào những năm 1950, QED là lí thuyết hoàn hảo duy nhất của ngành vật lí hạt cơ bản để diễn tả tương tác điện-từ. QED, mà Feynman gọi là hòn ngọc của lí thuyết trường lượng tử, đạt tới mức chính xác một phần mười tỉ khi so sánh thực nghiệm và tính toán; hai ví dụ là momen-từ lưỡng cực dị thường của electron và các trạng thái năng lượng cực kì tinh vi của nguyên tử hydrogen.

Nguyên lí đối xứng đóng vai trò cốt yếu cho sự hoàn tất của QED nói riêng và cho sự khám phá những định luật vận hành và cấu trúc của vật lí hạt cơ bản nói chung. Nó rọi sáng chỉ đường cho việc phát hiện ra hai định luật tương tác cơ bản mới lạ là QCD và điện-yếu.

Thật vậy, cả 3 lực: mạnh, điện từ và yếu đều bị chi phối, điều hành bởi một nguyên lí căn bản gọi là **đối xứng chuẩn định xứ** (local gauge symmetry), một công cụ nhiệm mầu để phát hiện ra cả 3 định luật cơ bản nói trên. Đối xứng này xác định trước hết là phải tồn tại những boson chuẩn mang spin 1 để truyền tải lực cho quark và lepton tương tác, những boson chuẩn này tuân theo phương trình Maxwell (cho photon của lực điện-từ) và Yang-Mills (cho gluon của lực mạnh và W, Z của lực yếu).

Lịch sử khám phá QED thực ra đã đi con đường ngược lại: electron và dòng điện của nó (lấy từ phương trình Dirac) gắn kết với photon (diễn tả bởi phương trình Maxwell) để thiết lập ra định luật tương tác điện-từ (QED). Khi phân tích cấu trúc toán học của QED thì nguyên lí đối xứng chuẩn định xứ được phát hiện. Đối xứng này từ đó trở thành ngọn hải đăng trong ngành vật lí hạt, khi khai thác và mở rộng nó thì hai định luật của tương tác mạnh và yếu được khám phá; theo thứ tự mang tên QCD và điện-yếu. Tóm lại:

QED ⇒ đối xứng chuẩn ⇒ định luật Yang-Mills: QCD và điện-yếu

IIIa. Vài điều về Đối xứng

Trong tiến trình khám phá các định luật khoa học, nhiều nhà nghiên cứu lấy nguồn cảm hứng từ cái đẹp cân đối hài hòa của thiên nhiên để quan sát, tìm tòi, suy luận, sáng tạo. Cái đẹp đó có thể chủ quan trong nghệ

thuật, văn chương, hội họa, âm nhạc nhưng trong khoa học tự nhiên nó khách quan, định lượng và mang tên gọi *đối xứng*. Với công cụ toán học là *nhóm đối xứng*, người ta đã phân tích, xếp đặt thứ tự các trạng thái, phát hiện phương trình diễn tả quy luật tương tác của hệ thống và tiên đoán những hệ sẽ được kiểm chứng bởi thực nghiệm. Tìm kiếm những đối xứng và sự vi phạm trật tự của nó, cũng như xác định được những gì bất biến trong vật lí là phương pháp phổ biến và hữu hiệu.

Đối xứng được định nghĩa theo nhà toán học Hermann Weyl (1885-1955) như sau: một định luật khoa học mang một tính đối xứng nếu nó không thay đổi khi ta dùng phép biến chuyển tác động lên nó. Hình cầu là minh hoạ điển hình của một vật thể đối xứng: phép quay trong không gian ba chiều với bất kì một góc nào xung quanh tâm của hình cầu không làm nó thay đổi hình dạng. Nói cách khác, đường kính của hình cầu là một *bất biến* của phép quay xung quanh tâm của nó.

Có hai định lí vô cùng phong phú - khám phá bởi nhà nữ toán học Emmy Noether năm 1918 - theo đó khi một tính đối xứng chi phối một hệ thống vật lí nào đó thì phải có một định luật bảo toàn kèm theo, và như vậy phải có một đại lượng bất biến tương ứng. Định lí thứ nhất liên quan đến tính đối xứng toàn bộ (global symmetry) hàm ý là phép biến chuyển không phụ thuộc vào từng điểm của không-thời gian, diễn tả bởi *tứ*-vectơ x^{μ}. Định lí thứ hai liên quan đến tính đối xứng định xứ (local symmetry) hàm ý là phép biến chuyển phụ thuộc vào x^{μ}, nó phong phú hơn nhiều vì nhờ đó mà phát hiện một trường tương tác mới lạ gọi là boson chuẩn có spin 1 và điều kì diệu tiếp theo là khám phá ra phương trình diễn tả sự tương tác của chúng.

Mỗi định luật căn bản của vật lí nhiều khi tuân thủ một phép đối xứng nào đó mà nhà nghiên cứu cần phát hiện ra.

Ví dụ của định lí Noether thứ nhất là luật bảo toàn *năng lượng*, hệ quả của tính đối xứng *toàn bộ* bởi sự chuyển đổi tịnh tiến của *thời gian* (một thí nghiệm thực hiện hôm nay, năm trước hay tuần sau, trong cùng một điều kiện, đều giống hệt nhau). Tính đối xứng bởi sự chuyển đổi tịnh tiến của *không gian* (thí nghiệm thực hiện trong cùng một điều kiện tại Hà Nội, Paris,

Washington đều như nhau) cho ta định luật bảo toàn *xung lượng*. Hai định luật bảo toàn này, theo thứ tự, diễn tả tính đồng nhất của thời gian (lúc nào cũng thế) và của không gian (ở đâu cũng vậy). Ngoài ra còn có đối xứng bởi phép quay xung quanh một trục, nó đưa đến định luật bảo toàn *xung lượng góc*. Định luật này diễn tả tính đẳng hướng của không gian (bất kì chiều hướng nào cũng tương đương nhau). Đồng nhất và Đẳng hướng là hai đối xứng cơ bản của không gian và thời gian.

Một ví dụ của định lí Noether thứ hai là sự bảo toàn điện tích, hệ quả của phép đối xứng chuẩn *định xứ* trong lực điện-từ. Điện tích không bao giờ mất đi hay sinh ra, nó bất biến bởi phép *biến chuyển chuẩn* (gauge transformation). Danh từ chuẩn, cũng do Hermann Weyl đưa ra, hàm ý là không có một thang chuẩn mực, một thước đo tuyệt đối nào trong cách tính toán, đo lường giá trị nội tại của các đại lượng khoa học. Mét hay một năm ánh sáng, đơn vị nhiệt độ Fahrenheit hay Celsius đều tương đương, đó chỉ là ước lệ của con người. Bất biến bởi đối xứng chuẩn hàm ý là giá trị tự tại của một đại lượng không phụ thuộc vào phương cách, chuẩn mực, đơn vị mà ta dùng để đo lường, tính toán.

Đối xứng chuẩn đóng một vai trò cực kì quan trọng trong tiến trình khám phá, khởi đầu trong điện từ và sau đó lan rộng sang nhiều ngành khoa học như vật lí hạt, vật lí chất rắn, vũ trụ thiên văn, từ đó dẫn đến các ứng dụng kì diệu trong công nghệ liên quan đến những ngành này[13].

---

[13] Tạm kể mấy thành quả kì diệu mà công nghệ mang đến cho đời sống hằng ngày:
(i)- Mạng lưới toàn cầu (www) được sáng tạo và sử dụng đầu tiên bởi các nhà vật lí ở CERN. Vì hàng ngàn nhà vật lí ngành năng lượng cao này đến từ nhiều quốc gia khác nhau nên không phải lúc nào cũng có thể thường xuyên làm việc ở CERN, để dễ dàng cộng tác và trao đổi rất nhiều dữ liệu, cùng nhau phân tích tổng hợp nhanh chóng các kết quả nghiên cứu, khoảng năm 1990 họ đã tạo ra mạng lưới toàn cầu. Chưa đầy mười năm sau, internet đã nhanh chóng tràn ngập thị trường thông-truyền-tin quốc tế mà điển hình là trang truy cập Google.
(ii)- Cuộc *cách mạng số* trong những phương tiện truyền thanh, truyền hình, quay phim, điện thoại v.v. được phát triển nhờ những khám phá về laser và chất bán dẫn mà đại diện là các linh kiện vi tính, vi điện tử, quang điện tử.
(iii)- Hệ thống GPS (Global Positioning System) để xác định tức khắc các địa điểm trên toàn cầu đã được trang bị cho các phương tiện vận tải, thông-truyền tin. Hệ thống đó phụ thuộc căn bản vào máy đo thời gian vô cùng chính xác (đồng hồ nguyên tử khai thác sự dao động tuần hoàn của các nguyên tử vi mô) ban đầu được sử dụng với mục đích khoa học thuần túy để kiểm chứng thuyết tương đối rộng trong vũ trụ học và thiên văn. Theo thuyết này nhịp độ của đồng hồ thay đổi với

Vậy đối xứng chuẩn và biến chuyển chuẩn là gì? Ai trong chúng ta khi làm quen với cơ học lượng tử đều biết rằng bình phương độ lớn của hàm số sóng $|\Psi(x)|^2$ của electron cho ta xác suất trạng thái của nó. Ta thấy ngay phép biến chuyển chuẩn $\Psi(x) \to e^{ie(x)}\,\Psi(x)$ với bất kì một hàm thực $\alpha(x)$ nào đều không làm thay đổi $|\Psi(x)|^2$ của electron. Biến chuyển chuẩn (chuyển pha) có hai đặc tính là liên tục (vì $\alpha(x)$ là hàm liên tục của x) và định xứ. Tính từ "định xứ" nhấn mạnh $\alpha(x)$ tuỳ thuộc vào biến số x, chữ viết tắt của *tứ-vectơ* $x^\mu \equiv (ct, x)$ diễn tả không-thời gian bốn chiều.

Cũng vậy phương trình Maxwell của photon, diễn tả bởi *tứ-vectơ* điện thế $A_\mu(x)$, không thay đổi bởi phép biến chuyển $A_\mu(x) \to A_\mu(x) - (1/e)\,\partial\alpha(x)/\partial x^\mu$, thêm vào hay bớt đi đạo hàm $\partial\alpha(x)/\partial x^\mu$ của bất kì hàm $\alpha(x)$ nào trong $A_\mu(x)$ cũng không làm thay đổi phương trình Maxwell. Định luật điện-từ bất biến bởi phép biến chuyển $A(x) \to A_\mu(x) - (1/e)\,\partial\alpha(x)/\partial x^\mu$ và $\Psi(x) \to e^{ie(x)}\,\Psi(x)$ với bất kì hàm thực $\alpha(x)$ nào[14].

---

sức hút của trái đất, trọng lực giảm trên các vệ tinh GPS thì tần số dao động cũng giảm theo, hay thời gian trôi nhanh lên.
(iv)- Công nghệ liên quan đến y tế dùng máy gia tốc của các hạt proton hay electron, laser trong giải phẫu, trị bệnh, máy chụp hình nổi như MRI, PET (positron emission tomography) trong đó hạt positron (tức *phản* electron) được tận dụng để theo dõi sự biến đổi của tế bào.
(v)- Hiện tượng siêu dẫn điện-từ ở nhiệt độ thấp (từ sát 0 K đến 165 K) là một đặc trưng của vật lí lượng tử. Vật liệu siêu dẫn không có điện trở, điện không bị thất tán nếu truyền tải bằng dây siêu dẫn. Hơn thế nữa, một thanh nam châm để gần một vật liệu siêu dẫn sẽ bị đẩy bật ra ngoài, khác với điện từ ở điều kiện bình thường. Do đó siêu dẫn có nhiều triển vọng cho công nghiệp của thế kỉ 21, đặc biệt trong sự sản xuất, tích trữ và vận chuyển năng lượng. Một ví dụ khác là vật liệu siêu dẫn có khả năng điều khiển được sự tổng hợp nhiệt hạch trong lò phản ứng nhiệt hạch quốc tế ITER xây dựng ở Cadarache miền Nam nước Pháp. Ngoài ra còn phải kể đến khả năng của siêu dẫn trong các ngành liên quan đến điện tử (máy tính và dữ kiện dùng vật liệu siêu dẫn), đến sinh học (thiết bị sensor cực kì nhạy bén), đến vận tải (tàu hỏa tốc hành nâng lên bởi từ trường siêu dẫn, không chạm đường ray nên tàu chạy rất nhanh và an toàn).

[14] Trong phương trình Maxwell thực ra có 6 đại lượng vật lí gồm vectơ điện **E** và vectơ từ **B** (mỗi vectơ có 3 thành phần), nhưng **E** và **B** có thể suy ra từ một **tứ-vectơ** điện thế A_μ với 4 thành phần. Tứ-vectơ A_μ này được coi như công cụ để thao tác tính toán dễ dàng, nó không thể quan sát đo lường được trực tiếp, khác với **E** và **B**. Có muôn vàn điện thế $A_\mu(x)$ khác nhau ở mỗi điểm của không-thời gian (vì có thể thêm bớt vào $A_\mu(x)$ bất kì một đạo hàm $\partial\alpha(x)/\partial x^\mu$), nhưng chỉ cho ra duy nhất một **E** và một **B**, chứng minh tính bất biến của các đại lượng vật lí bởi phép biến chuyển chuẩn. Cái tùy tiện của điện thế A_μ tuy vậy không phải là một trở ngại, trái lại là khác vì ta có thể lợi dụng điều kiện đó để, tùy trường hợp, thay thế chuẩn mực này bằng chuẩn mực khác để dễ dàng tính toán, miễn là cuối cùng kiểm soát kết quả tính toán phải không phụ thuộc vào bất kì một chuẩn mực nào.
Nói một cách nôm na là đo lường khoảng cách thời gian trôi không phụ thuộc vào loại đồng hồ và đơn vị thời gian.

Cụ thể, ta hình dung đối xứng này như sau: điện thế của trái đất là 1.000.000 volt và hai cực điện trong nhà là 1.000.000 volt và 1.000.220 volt, nhưng máy móc trong nhà chúng ta chạy với điện thế 220 volt không hề trục trặc. Điều quan trọng là hiệu số của điện thế chứ không phải điện thế ở mỗi điểm x của không-thời gian. Có muôn ngàn điện thế khác nhau ở mọi nơi trong hoàn vũ bao la, nhưng định luật chi phối sự vận hành của chúng phải được điều chỉnh ra sao để cho ta một trường điện từ duy nhất, lực điện từ trong máy móc của chúng ta cũng phải giống lực điện từ trên các thiên thể. Hệ quả của đối xứng định xứ là số lượng điện tích bao giờ cũng được bảo toàn trong các quá trình vật lí, chúng bất biến với thời gian và không gian. Đó là ý nghĩa vật lí của các loại đối xứng định xứ, nó tác động lên cả bốn lực cơ bản: hấp dẫn, mạnh, điện-từ, yếu.

IIIb. Từ đối xứng đến định luật

1- Theo thuyết tương đối rộng (luật hấp dẫn), người di chuyển với gia tốc cũng có thể nói họ đứng yên vì có thể thay thế lực mà họ bị tác động lên bằng lực hấp dẫn mà họ bị đặt vào. Sự tương đương giữa gia tốc và trọng lực có thể minh họa qua hình ảnh quen thuộc của phi hành gia lơ lửng đứng yên trong tàu vũ trụ bay với gia tốc lớn. Nó phản ánh ý tưởng mà Einstein coi là đáng mãn nguyện nhất trong đời ông: "Một người rơi từ trên cao xuống không cảm thấy sức nặng của mình". Theo nghĩa đó, lực hấp dẫn tuân theo một phép đối xứng định xứ, nó bảo đảm rằng tất cả các hệ quy chiếu ở mọi điểm của không-thời gian đều tương đương nhau.

2- Đối xứng chuẩn định xứ khẳng định tính bất biến của định luật điện-từ bởi những di chuyển của điện tích từ điểm này đến điểm kia của không-thời gian. Tương tự, đối với lực mạnh của hạt nhân nguyên tử thì hai hạt proton và neutron đều hoàn toàn bình đẳng, định luật tương tác mạnh của hạt nhân không thay đổi bởi sự hoán chuyển proton ↔ neutron ở bất kì điểm nào trong không-thời gian.

Và đây là điểm cốt lõi: Sự tương đương của mọi hệ quy chiếu (bất kì

chúng chuyển động có hay không có gia tốc) xác định được luật hấp dẫn dưới dạng phương trình Einstein của thuyết tương đối rộng[15].

3- Định luật tương tác điện-từ giữa electron với photon cũng được phát hiện như vậy. Mở đầu chỉ có một trường electron $\Psi(x)$, với điều kiện là hoán chuyển $\Psi(x) \to e^{ie\alpha(x)}\Psi(x)$ không làm biến đổi dạng của hàm Lagrange[16] $\overline{\psi}(x)(i\hbar\gamma^\mu\partial_\mu - mc)\psi(x)$ của electron. Điều kiện này đưa tới hệ quả là phải xuất hiện một trường tứ-vectơ $A_\mu(x)$. Thực vậy, đạo hàm $\partial_\mu \equiv \partial/\partial x^\mu$ áp đặt lên $e^{ie\alpha(x)}\Psi(x)$ buộc phải có một trường $A_\mu(x)$ nào đó và trường này cũng phải hoán chuyển ra sao để triệt tiêu hệ số $\partial_\mu\alpha(x)$ và góp phần làm cho hàm Lagrange bất biến bởi hoán chuyển $\Psi(x) \to e^{ie\alpha(x)}\Psi(x)$. Hơn nữa, trường $A_\mu(x)$ và tenxơ liên đới $F_{\mu\nu} \equiv \partial_\mu A_\nu(x) - \partial_\nu A_\mu(x)$ lại tuân thủ phương trình Maxwell, vậy $A_\mu(x)$ chính là trường photon. Kết quả cuối cùng để cho hàm Lagrange bất biến là cả hai trường electron $\Psi(x)$ và photon $A_\mu(x)$ phải gắn kết dưới dạng $e\overline{\psi}(x)\gamma^\mu\psi(x)A_\mu(x)$, mà công thức này chính là định luật tương tác điện-từ giữa electron với photon, thật kì thú!

4- Cũng theo cách lập luận như trên, ta sẽ đi từ đối xứng giữa proton và neutron trong các quá trình của hạt nhân nguyên tử để phát hiện ra định luật tương tác của chúng, định luật này là phiên bản đầu tiên của lí thuyết chuẩn Yang-Mills. Thực thế, những tác động của neutron giống hệt như proton trong hạt nhân nguyên tử, vậy phép đối xứng định xứ giữa hai thành phần proton và neutron của nucleon (ở bất kì một điểm nào của không-thời gian) đòi hỏi tương tác mạnh của hạt nhân nguyên tử phải diễn tả được đặc tính bất biến của nó dưới sự hoán chuyển proton ↔ neutron.

---

[15] Trong phương trình Einstein $R_{\mu\nu} - (1/2)R\,g_{\mu\nu} = (8\pi G/c^4)T_{\mu\nu}$, hệ số $(1/2)Rg_{\mu\nu}$ (mà ông đã tìm ra và đặt thêm vào ngày 25/11/1915) đóng vai trò tối cần thiết để đáp ứng luật bảo toàn năng-xung lượng $\partial_\mu T_{\mu\nu} = \partial_\nu T_{\mu\nu} = 0$. Trước đó năm 1913, Grossmann và Einstein đã đi gần tới đích với tenxơ Ricci: $R_{\mu\nu} = (8\pi G/c^4)T_{\mu\nu}$, nhưng vế trái $\partial_\mu R_{\mu\nu}$ và $\partial_\nu R_{\mu\nu}$ đều $\neq 0$ trong khi vế phải $\partial_\mu T_{\mu\nu} = \partial_\nu T_{\mu\nu} = 0$ nên hệ số $(1/2)Rg_{\mu\nu}$ phải được thêm vào vế trái phương trình để đạo hàm của $R_{\mu\nu}$ và $(1/2)Rg_{\mu\nu}$ triệt tiêu nhau và phù hợp với định luật bảo toàn năng-xung lượng.

[16] Hiệu số giữa động năng và thế năng của một vật, hàm Lagrange đóng vai trò cực kì quan trọng trong cơ học cổ điển cũng như trong cơ học và trường lượng tử, nó cho ta phương trình vận chuyển và quỹ đạo của vật.

Chen Ning Yang cùng đồng nghiệp Robert Mills tìm ra được định luật tương tác đáp ứng phép đối xứng proton ↔ neutron này. Công trình cực kì phong phú đó gọi là lí thuyết chuẩn Yang-Mills[17] với nhóm đối xứng SU(2) giữa hai đối tượng là proton và neutron.

Áp dụng phương pháp này vào trường hợp của quark mang sắc tích bằng cách thay thế nhóm đối xứng SU(2) giữa proton và neutron bằng nhóm đối xứng $SU(3)_C$ giữa 3 sắc tích của quark, thuyết Yang-Mills xây dựng với $SU(3)_C$ do đó mang tên QCD và boson chuẩn của nó là gluon. Đối xứng chuẩn định xứ giữa 3 sắc tích của quark diễn tả tính bất biến của QCD bởi những di chuyển của sắc tích từ một điểm không-thời gian này đến một điểm không-thời gian kia.

---

[17] Thuyết Yang-Mills đã mở rộng thuyết điện-từ bằng cách thay thế electron bằng 2 thành phần của nucleon là proton và neutron, nhóm đối xứng U(1) của điện-từ được thay thế bởi nhóm SU(2) của Yang-Mills. Có thể tóm lược như sau:

(i)- Hoán chuyển giữa 2 vật thể proton ↔ neutron được thực hiện bởi nhóm đối xứng SU(2) với 3 ma trận 2×2 của Pauli τ^+, τ^-, τ^3 viết tắt là vectơ ma trận τ. τ^+ chuyển n thành p, τ^- chuyển p thành n, τ^3 giữ nguyên vẹn p và n. Đồng hành với vectơ ma trận τ là hàm vectơ $\alpha(x)$ cũng có 3 thành phần $\alpha_+(x)$, $\alpha_-(x)$, $\alpha_3(x)$ để cho tích số $\tau.\alpha(x)$ của hai vectơ τ và $\alpha(x)$ là một lượng vô hướng. Lượng $\tau.\alpha(x)$ và $e^{i\tau.\alpha(x)}$ thay thế cho, theo thứ tự, $\alpha(x)$ và $e^{ie\alpha(x)}$ của phép hoán chuyển chuẩn $\Psi(x) \rightarrow e^{ie\alpha(x)}\Psi(x)$ trong điện-từ. Với nhóm SU(2), ta có 3 ma trận Pauli nói riêng và với nhóm SU(N) ta có $(N^2 - 1)$ ma trận nói chung.

(ii)-Mở đầu là trường nucleon $\Psi_2(x)$ (có 2 thành phần proton và neutron) với điều kiện là phép hoán chuyển chuẩn $\Psi_2(x) \rightarrow e^{i\tau.\alpha(x)}\Psi_2(x)$ không làm biến đổi dạng của hàm Lagrange $\overline{\psi}_2(x)(i\hbar\gamma^\mu\partial_\mu - mc)\psi_2(x)$ của nucleon.

Điều kiện này đưa tới hệ quả là phải có 3 tứ-vectơ $A_\mu(x)$, viết gọn là vectơ $\mathbf{A}_\mu(x)$, đó là 3 boson chuẩn của nhóm SU(2). Tính toán ma trận cho ta tenxơ $\mathbf{F}_{\mu\nu} = \partial_\mu \mathbf{A}_\nu - \partial_\nu \mathbf{A}_\mu + \mathbf{A}_\mu \times \mathbf{A}_\nu$ thay thế tenxơ $\mathbf{F}_{\mu\nu} = \partial_\mu \mathbf{A}_\nu - \partial_\nu \mathbf{A}_\mu$ của điện-từ. Sự xuất hiện của tích số vectơ $\mathbf{A}_\mu \times \mathbf{A}_\nu$, đặc trưng của lí thuyết Yang-Mills, là do tính không giao hoán của các ma trận Pauli.

(iii)- Từ nhóm SU(2) ban đầu, ta mở rộng sang các nhóm đối xứng SU(N) khác. Boson chuẩn của điện từ (photon) được thay thế bởi $(N^2 - 1)$ boson chuẩn mở rộng $\mathbf{A}_\mu$. Các boson chuẩn Yang-Mills trực tiếp tác động với nhau qua số hạng được mở rộng $\mathbf{A}_\mu \times \mathbf{A}_\nu$ với $(N^2 - 1)$ thành phần.

QCD là thuyết Yang-Mills với nhóm đối xứng $SU(3)_C$ giữa 3 sắc tích của quark, và boson chuẩn của QCD là 8 gluon. Ronald Shaw môn đệ ở Đại học Cambridge của Abdus Salam cũng có ý tưởng tương tự, trong luận án tiến sĩ năm 1954, ông cũng tìm thấy phương trình (nay mang tên Yang-Mills) và không hề biết đến công trình của Yang-Mills lúc ấy chưa được in trên *Physical Review* **96,** 191 (1954). Ngày nay thông tin khoa học được nhanh chóng cập nhật với hệ thống arXiv.

IIIc. Tự do tiệm cận và nô lệ hồng ngoại

Về mặt cấu trúc toán học thì sự hoán chuyển của N vật thể bởi nhóm đối xứng SU(N) được biểu diễn với $(N^2 - 1)$ ma trận $N \times N$, tương ứng với $(N^2 - 1)$ boson chuẩn nối kết N vật thể với nhau. Với nhóm SU(2) ta có 3 ma trận Pauli, với nhóm SU(3) ta có 8 ma trận Gell-Mann và QCD có 8 boson chuẩn (gluon) nối kết quark; cả gluon lẫn quark đều mang sắc tích. Vì những ma trận của SU(N) phản giao hoán ($ab \neq ba$) nên đối xứng chuẩn với nhóm SU(N) mang tên đối xứng chuẩn *không* giao hoán.

Một hệ quả độc đáo do tính không giao hoán của nhóm SU(N) trong lí thuyết Yang-Mills nói chung (và nhóm $SU(3)_C$ trong QCD nói riêng) là các $(N^2 - 1)$ boson chuẩn phải *trực tiếp tác động* với nhau, khác với điện-từ không có tương tác trực tiếp này. Thực thế, nhóm đối xứng U(1) của QED là $e^{ie\alpha(x)}$ chỉ có *một* thông số $\alpha(x)$, tương ứng với *một* boson chuẩn (photon) nên đương nhiên đối xứng chuẩn U(1) giao hoán. Theo định lí Noether, hệ quả của đối xứng $SU(3)_C$ trong QCD là sự bảo toàn sắc tích, cũng như hệ quả của đối xứng U(1) trong QED là sự bảo toàn điện tích.

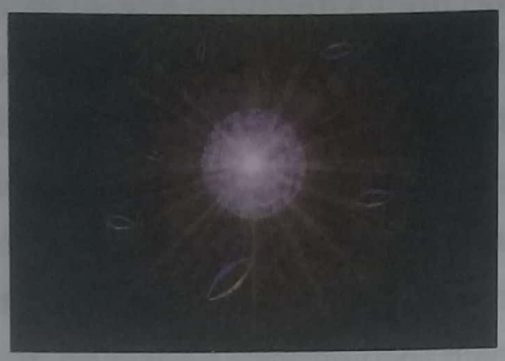
Tác động trực tiếp với nhau giữa các gluon là gốc nguồn của tính chất *"tự do tiệm cận"*[18], **theo đó,** cường độ của lực mạnh giảm đi khi năng-xung

---

[18] Tính chất độc đáo của QCD (do $\mathbf{A}_\mu \times \mathbf{A}_\nu$) là boson chuẩn gluon phải ***trực tiếp tác động*** với nhau (Hình e), khác với boson chuẩn của điện-từ (photon) không có tương tác trực tiếp này. Chính sự gắn bó giữa 3 gluon là nguồn gốc của tính chất "tự do tiệm cận", phát hiện đem lại giải Nobel 2004 cho ba tác giả David J. Gross, H. David Politzer và Frank Wilczek đã chứng minh được tính chất này. Để nhận được giải Nobel này, tất cả chỉ nhờ một dấu trừ, như Politzer đã vui vẻ bình luận trong diễn văn nhận giải.

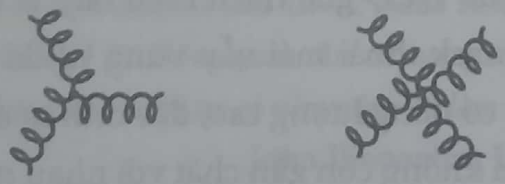
Thực thể, do tác động của các hạt ảo (hạt mà năng lượng E, xung lượng $\mathbf{k}$ và khối lượng m của nó không tuân thủ đẳng thức Einstein $E^2 - \mathbf{k}^2c^2 = m^2c^4$ của hạt thực) tràn ngập chân không lượng tử nên các hằng số tương tác không cố định mà thay đổi cùng với năng lượng, một đặc trưng chung cho các lí thuyết trường lượng tử tái chuẩn hóa. Đặc tính này gọi là hằng số di động (running coupling constant); đạo hàm (đối với năng lượng) của hằng số di động gọi là hàm beta, vậy tùy theo hàm beta dương hay âm mà hằng số di động tăng hay giảm. Trong QED, hàm beta dương, thực nghiệm cho $\alpha_{em}(E = 0) \sim 1/137$ và $\alpha_{em}(E = 100\ \text{GeV}) \sim 1/129$.

Tại sao hằng số lại thay đổi tuy chỉ nhẹ nhàng như hàm Logarithm? Lí do là electron trần trụi lúc nào cũng bị vây quanh, trước hết bởi những positron bị electron hút gần vào (do lực Coulomb), rồi những positron ấy lại bị nhiều electron khác ghép thành cặp, cứ thế liên tục chúng ngăn chặn làm cho photon khó thăm dò electron. Muốn đến gần electron để đo lường tính chất của nó thì photon phải có năng lượng E đủ lớn để vượt qua rào cản của các cặp fermion ảo e^-e^+ vây quanh electron trần trụi, và hằng số tương tác điện-từ α_{em} tăng lên cùng với E (xem Hình d).



Hình d: electron trần trụi ở trung tâm bị rào cản bởi muôn vàn cặp ảo electron-positron (hình bầu dục xanh vàng).

Ngược lại, hàm beta của QCD có dấu âm, khi $E \to \infty$ thì hằng số di động của tương tác mạnh nhỏ dần như $1/\text{Log}(E) \to 0$. Lí do là khi gluon thăm dò quark lại có vài bạn gluon xung quanh (Hình e) đi kèm trợ giúp (điều mà photon không có) nên gluon dễ dàng tiến gần đến quark, mặc dù cũng bị rào cản bởi các cặp ảo quark-phản quark giống như trường hợp photon bị rào cản bởi các cặp e^-e^+ trong QED. Nhưng được nâng đỡ bởi các gluon bạn nên rốt cuộc thắng được rào cản của các cặp ảo quark-phản quark. Chính xác ra hàm beta của QCD $\sim 2N_F - 11N_C$. N_F là số lượng hương vị và $N_C = 3$ là số lượng sắc tích của quark. Vì $N_F = 6$ (chỉ có 6 loại quark *u, d, c, s, t, b* như ta biết ở năng lượng dưới 200 GeV) nên hàm beta của QCD có dấu âm và QCD có tính tự do tiệm cận. Ngược lại, nếu trong tự nhiên số lượng hương vị của quark $N_F \geq 17$ thì hàm beta của QCD cũng có dấu dương như QED và mất đi tính chất đặc thù "tự do tiệm cận".



Hình e: 3 và 4 gluon gắn kết tương tác với nhau.

Khó khăn trong kĩ thuật tính toán hàm beta của QCD là có 3 và 4 boson chuẩn (gluon) của QCD trực tiếp tác động và trợ giúp nhau (Hình e), điều mà QED thiếu.Tính toán được hàm beta của QCD là cả một kì công, dấu cộng hay trừ ở đây quyết định tất cả. Khi Politzer (mới 24 tuổi) trình bày dấu trừ cho thầy hướng dẫn luận án của ông là Sidney Coleman, một chuyên gia hàng đầu về lí thuyết trường lượng tử ở Đại học Harvard, Coleman cho rằng trò mình lầm và bắt làm lại. Wilzeck (mới 22 tuổi) cùng Gross, thầy hướng dẫn luận án ở Đại học Princeton, cộng tác mật thiết trong việc tìm ra dấu trừ cho hàm beta của QCD.

Ngược với tự do tiệm cận (ở năng lượng cao) là "nô lệ hồng ngoại" hàm ý là ở năng lượng thấp (ánh sáng hồng ngoại) thì quark bị cầm tù trong hadron, ở năng lượng cao thì quark được tự do. Viện Toán học Clay (Clay Mathematics Institute) vẫn đang treo giải 1.000.000 Đô la cho người nào chứng minh chính xác được tính nô lệ hồng ngoại của QCD. Nói theo ngôn ngữ vật lí thì "nô lệ hồng ngoại" hàm ý sự hiện hữu của khe năng lượng $\Delta \neq 0$ tương tự như trong hiện tượng siêu dẫn điện-từ. Cũng viện Clay này năm 2004 đã vinh tặng hai G.S. Gérard Laumon và Ngô Bảo Châu huân chương giải được một phần của bổ đề Langlands với nhóm unita.

lượng E dùng để thám dò quark tăng lên, hằng số tương tác α_{QCD} nhỏ dần như 1/Log(E) khi E tăng. Trong vùng năng lượng cao, quark và gluon không liên kết chặt chẽ với nhau nữa và được tự do; ngược lại, ở vùng năng lượng thấp (nhiệt độ bình thường), quark và gluon bị giữ chặt trong các hadron. Tính chất lạ lùng này, được gọi là *"nô lệ hồng ngoại"*, có thể coi như hệ quả của sự nối dài liên tục từ E lớn xuống E nhỏ của hàm 1/Log(E), hàm này tăng khi E giảm làm cho $\alpha_{QCD} > 1$. Vì khoảng cách không gian R và năng-xung lượng E tỉ lệ nghịch theo nguyên lí bất định, tính "nô lệ hồng ngoại" khiến cho cường độ α_{QCD} của lực mạnh gắn quark với nhau lại tăng lên với khoảng cách của hai quark, càng đẩy chúng ra xa để tách rời chúng thì lực gắn kết chúng lại càng mạnh hơn lên để kéo giữ chúng với nhau, trái ngược với lực Coulomb của điện-từ bị giảm theo bình phương của khoảng cách giữa hai điện tích. Quark bị cầm tù trong hadron, ở nhiệt độ bình thuờng chúng không sao thoát ra ngoài.

Khi phân tích chi tiết các số liệu thực nghiệm về phân bố tán xạ, điều ngạc nhiên là ở năng lượng cao (nhiệt độ lớn), các thành phần cơ bản quark và gluon hầu như không chút nào bị gắn kết chặt chẽ trong các hadron. Tính tự do tiệm cận của QCD giải thích điều này vì ở năng lượng cao thì lực mạnh nhỏ dần, quark thoải mái vẫy vùng tự do trong hadron. Cũng vậy trong máy gia tốc có năng lượng cao, đặc tính tự do tiệm cận tiên đoán quark cũng như gluon không còn gắn chặt với nhau nữa mà tập hợp vĩ mô của chúng trở thành lỏng và quánh như mật, một trạng thái mới của vật chất gọi là quark-gluon plasma. Trong những giây phút đầu tiên của Vụ nổ lớn với năng lượng, nhiệt độ, áp suất, mật độ cao cùng cực, quark và gluon hoàn toàn tự do không còn chút nào gắn kết, tương tác với nhau, vật lí thời nguyên thủy thực là đơn giản! Khi vũ trụ nguội dần, entropy tăng lên, lực mạnh giữa quark gluon cũng tăng dần, gắn kết chúng để thành hadron và vật chất nói chung trở nên phức tạp.

Tính chất độc đáo "tự do tiệm cận" của QCD đã đem lại giải Nobel 2004 cho Gross, Politzer và Wilczek.

Đặc điểm cần nhấn mạnh của đối xứng chuẩn định xứ là nó đòi hỏi các boson chuẩn - làm trung gian sứ giả cho những trường vật chất quark và

lepton tương tác với nhau - phải *không có khối lượng*[19]. Photon hay gluon là ví dụ của boson chuẩn không có khối lượng. Đó cũng là điều kiện tiên quyết cho sự tái chuẩn hóa thành công của QED và QCD.

Cuối cùng còn lại lực yếu. Đối xứng chuẩn, một nguyên lí mầu nhiệm, có thể đóng vai trò định hướng nào cho lực yếu không? Nhìn bề ngoài thì vô vọng vì khối lượng M_W của hạt trung gian truyền tải lực yếu không những khác 0 mà còn rất lớn theo nguyên lí bất định ($M_W \sim \hbar/R_W$) bởi độ dài truyền tải của lực yếu R_W thì cực kì nhỏ do nó chỉ tác động trong hạt nhân nguyên tử.

Ấy thế mà câu hỏi trên đã có được lời giải đáp, sau nhiều chặng đường khó khăn mà ngoạn mục mang tên "**phá vỡ tự phát**" của đối xứng chuẩn định xứ, điều liên quan đến boson Higgs, và sẽ đề cập ở Phần IV về thuyết điện-yếu.

PHẦN IV. HỢP ÂM TRONG VÙNG ĐIỆN-YẾU

Lí do hiển nhiên là hầu hết các thành viên chủ chốt của Ban Lí thuyết ở CERN đã không quan tâm tới tương tác yếu và không tuyển dụng những nhà vật lí trẻ có tiềm năng đã làm việc ở đó.

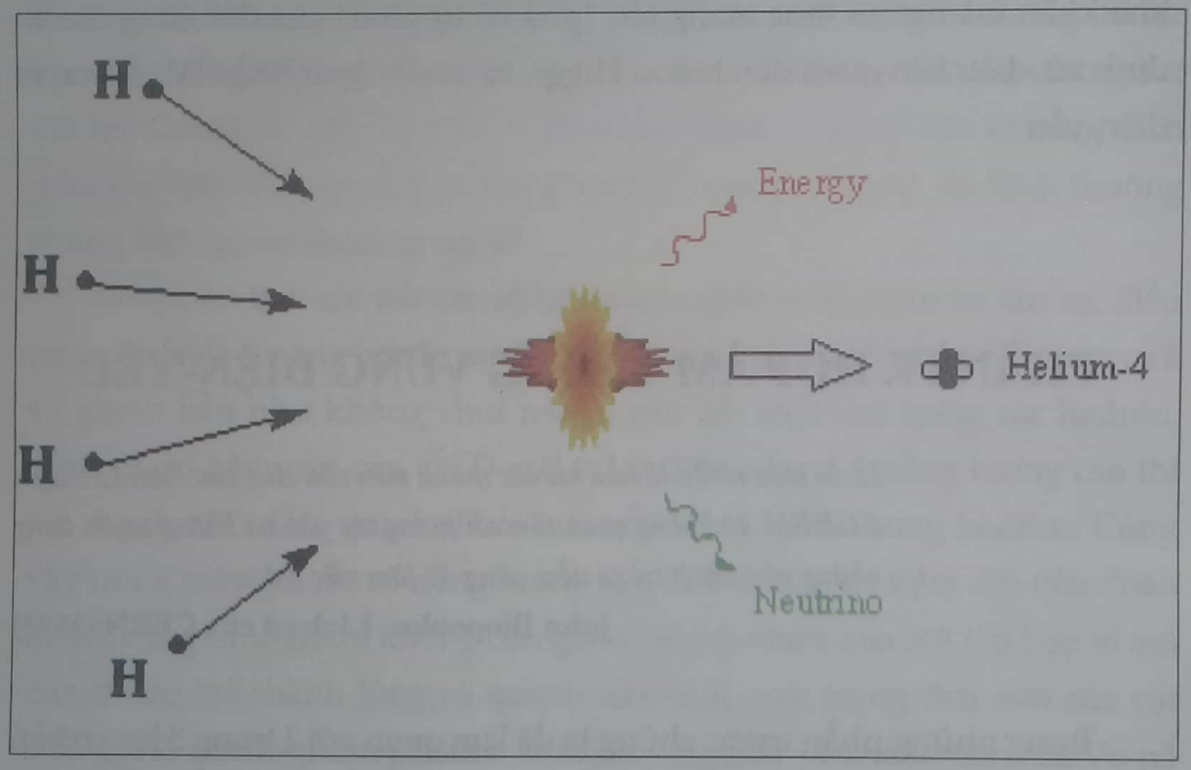
John Iliopoulos, Lịch sử của CERN (1993)

Trong những phần trước, chúng ta đã làm quen với 2 trong 3 lực cơ bản của Tự nhiên: lực điện-từ (QED) và lực hạt nhân mạnh (QCD), phần cuối này dành cho lực hạt nhân yếu. Quark có điện tích và sắc tích nên bị chi phối bởi cả 3 lực: điện-từ, hạt nhân mạnh, hạt nhân yếu. Electron, muon, tauon mang điện tích nhưng không có sắc tích nên chịu sự tác động của 2 lực: điện-từ và yếu. Neutrino không có cả sắc tích lẫn điện tích nên duy nhất chỉ có lực yếu chi phối.

---

[19] Thực thế nếu boson chuẩn A_μ có khối lượng $M \neq 0$, thì hệ số $M^2 A_\mu A^\mu$ làm cho hàm Lagrange không còn bất biến bởi hoán chuyển chuẩn $A_\mu(x) \to A_\mu(x) - \partial\alpha(x)/\partial x^\mu$.

Thuật ngữ yếu thoảng nghe như chuyện phù vân, ngay cả đối với nhiều nhà vật lí hạt trước năm 1970 như Iliopoulos đã nói ở trên. Thực ra điều ngược lại mới đúng: lực yếu chi phối sự phân rã của hạt nhân nguyên tử, chủ chốt điều hành những phản ứng nhiệt hạch trong các thiên thể, phát tán năng lượng cực kì cao mang ánh sáng cho bầu trời ban đêm, phóng ra muôn tỉ hạt neutrino từng giây phút đang xuyên qua da thịt chúng ta. Sự tổng hợp nhiệt hạch trong tâm lõi Mặt Trời làm nó nóng tới khoảng 20 triệu độ là hiện tượng phát xạ neutrino bởi lực yếu (Hình 7).



Hình 7. tổng hợp nhiệt hạch: $4\,H \rightarrow He + 2\,e^{+} + 2\,\nu_e$

Cách đây 18 ngàn năm trong giai đoạn cuối cùng của thời kì băng hà, tuyết phủ dày đặc bao trùm phần lớn trái đất, ngay cả vùng xích đạo. Người tiền sử có thể đã thoát khỏi nguy cơ tuyệt chủng bởi giá lạnh kinh hoàng này, vì trong thời kì băng lạnh đó những núi lửa hoạt động cực mạnh, khí nóng lan toả nhanh chóng xuống mặt đất qua hiện tượng nhà kính. Nhiệt lượng phun ra từ núi lửa là do phóng xạ neutrino của Uranium ở trung tâm trái đất.

Tiến trình tìm hiểu và khám phá định luật của tương tác yếu khoảng đầu những năm 1970 đã đóng vai trò quyết định và mở đường cho Vật lí Hạt thăng hoa với những phát hiện kì diệu như:

- Ba hương vị mới của vật chất là duyên, đáy, đỉnh;
- Boson chuẩn của lực yếu $W^{\pm}$ và Z;
- Chỉ có ba loại neutrino với khối lượng cực kì nhỏ, những khối lượng quá ư nhỏ bé đó đã được đo lường bằng cách xác định sự hoán chuyển giữa ba loại neutrino $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$;
- Boson Higgs mang khối lượng cho vạn vật để vũ trụ hình thành, trong đó có con người.

Cả hai lực mạnh và yếu đều được diễn tả bởi thuyết Yang-Mills với nhóm đối xứng $SU(3)_C$ của ba sắc tích cho lực mạnh và nhóm đối xứng $SU(2)_W$ của cặp đôi quark *u*, *d* (hay cặp đôi lepton e^-, ν_e) cho lực yếu. Hơn nữa lực điện-từ (nhóm đối xứng U(1)) lại hòa nhập với lực yếu nên cấu trúc của SM được biểu diễn ngắn gọn như tích số của ba nhóm đối xứng: $SU(3)_C \times SU(2)_W \times U(1)$ theo thứ tự chi phối ba lực mạnh, yếu và điện-từ.

IVa. Neutrino, cái thuở ban đầu

Năm 1896, lực yếu được phát hiện khi Henri Becquerel (giải Nobel 1903) quan sát thấy một số hạt nhân nguyên tử tự nhiên phóng xạ mà không do một tác động nào từ bên ngoài. Một trong những bức xạ tự nhiên là sự phân rã Carbon-14 ra Nitrogen-14 kèm theo electron và neutrino gọi là phân rã β, diễn tả bởi $n \to p + e^- + \bar{\nu}_e$.

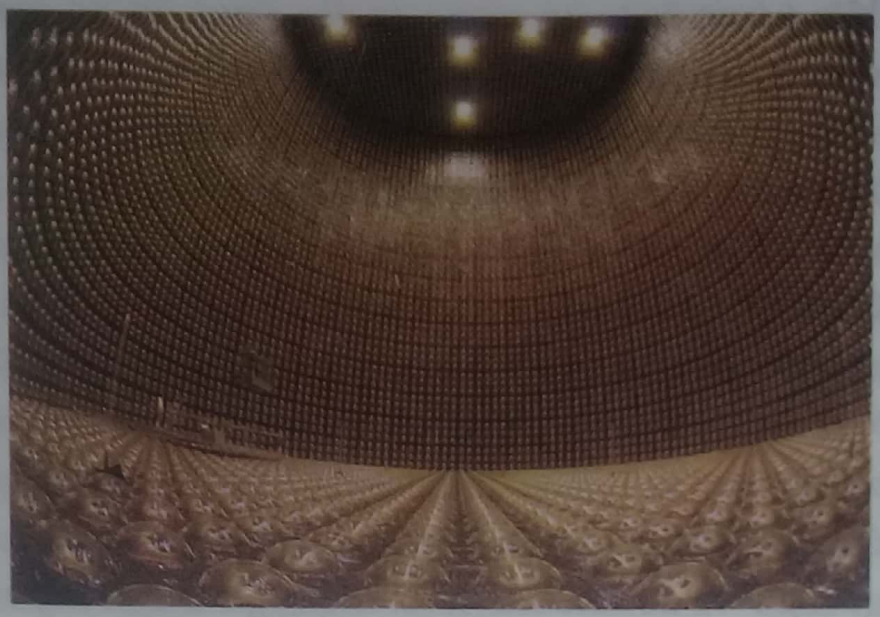
Thực ra trước năm 1930 người ta chưa biết đến neutrino mà chỉ biết đến electron, và cho rằng $n \to p + e^-$, nhưng nếu thế thì theo luật bảo toàn năng lượng, electron chỉ có một năng lượng duy nhất là $E = E_n - E_p$. Khi đo lường năng lượng của electron, người ta đã ngạc nhiên vì thấy phổ năng lượng của nó là một đường cong liên tục với bất kì một trị số nào nằm giữa 0 và $E_n - E_p$. Không lẽ định luật phổ quát nhất của khoa học, định luật bảo toàn năng lượng, lại bị vi phạm trong trường hợp đặc biệt của phân

rã β? Ngay cả Niels Bohr (giải Nobel 1922), vị trưởng lão của trường phái Copenhagen về cách diễn giải cơ học lượng tử, người đặt nền tảng cho lí thuyết nguyên tử, cũng miễn cưỡng chấp nhận sự vi phạm này.

Nhưng Wolfgang Pauli (giải Nobel 1945) không thể đồng ý với cách thỏa hiệp dễ dàng ấy của Bohr, bảo toàn năng lượng là định luật phổ quát mà tất cả mọi hiện tượng phải tuyệt đối tuân theo. Để giải đáp nghịch lí này, năm 1931, Pauli giả định là có một hạt gì đó phát ra cùng với electron (sơ đồ n → p + electron + *hạt gì đó*) để chia sẻ với nó tổng số năng lượng E_n - E_p. Vì neutron trung hòa điện tích và cặp proton-electron triệt tiêu điện tích của nhau nên hạt giả định bởi Pauli phải trung hòa không mang điện tích, nó cũng phải có spin 1/2 như electron và hầu như không có khối lượng. Hơn nữa, so với phóng xạ rất nhanh của điện từ (như tia X) thì phân rã β lại rất chậm chạp, cường độ phân rã rất nhỏ nên được gọi là lực yếu và neutrino hoàn toàn bị chi phối bởi lực này. Khác với electron mang điện tích, hạt giả định bởi Pauli cực nhẹ và bị chi phối duy nhất bởi một lực mà cường độ tương tác lại rất nhỏ nên xác định sự tồn tại của nó bằng thực nghiệm là một điều cực kì khó khăn và Pauli đành tuyên bố: Tôi trót phạm một điều tai quái là giả định sự tồn tại của một hạt nhưng lại không có cách nào dò tìm ra nó được.

Mang kí hiệu ν, hạt ma rất khó dò tìm này sau đó được gọi là neutrino (neutron nhỏ), tên đặt bởi Enrico Fermi (giải Nobel 1938), vị giáo hoàng của nền vật lí Ý, khi ông ghép *trung hòa* (neutro) với *nhỏ xíu* (ino), hai ngôn từ gắn bó với quê hương ông. Lần đầu tiên năm 1955 hạt ν_e được phát hiện bởi Clyde Cowan và Frederick Reines (giải Nobel 1995) trong một thực nghiệm ở lò điện hạt nhân Savannah River. Ngày nay chùm neutrino được tạo ra dễ dàng từ các máy gia tốc hạt mà LHC của CERN đóng vai trò hàng đầu thế giới.

Nhưng neutrino không chỉ được tạo ra trên trái đất, còn có muôn tỉ neutrino trong vũ trụ từ các thiên thể xa xăm, kể cả Mặt Trời, đến với chúng ta, vấn đề là làm sao dò được và xác định cùng đo lường tính chất của chúng. Các nhà vật lí-thiên văn đã dùng nhiều máy móc khác nhau để tìm bắt, quan sát neutrino.



Hình 8. Máy dò neutrino Super-Kamiokande

Ở Kamiokande (Nhật), máy dò là một bình khổng lồ chứa 50 ngàn m^3 nước tinh khiết như pha lê trong đó lủng lẳng hàng ngàn thiết bị điện tử tinh vi đặt dưới hầm mỏ thiếc (Hình 8), nhóm IMB đặt máy trong hầm mỏ muối ở Ohio (Mĩ), ở Baksan (Nga) đài quan sát neutrino đặt sâu trong rặng núi Caucasus. Ngày 23 tháng 2 năm 1987 ba đài *"thiên văn-neutrino"* này đã quan sát đo lường được tất cả 24 hạt đến từ một siêu tân tinh (supernova) SN1987A trong thiên hà lùn Magellan (sát cạnh dải Ngân hà) cách đây 163 ngàn năm đã nổ bùng, mà độ chói sáng rực rỡ tương đương với mười tỉ mặt trời và phát tán khoảng 10^{58} hạt neutrino.

IVb- Thời xa vắng

1- Từ thực nghiệm, người ta thấy lực yếu có đặc điểm là nó vi phạm đối xứng gương (P) và đối xứng vật chất-phản vật chất (CP) trong khi các lực điện-từ và mạnh tuân thủ hai đối xứng này. P và CP là những đối xứng gián đoạn, khác với tính liên tục của đối xứng chuẩn. Bạn hình dung đối xứng gương như sau: tay phải (hay trái) của ta có hình trong gương hệt như tay trái (hay phải), và cái ta gọi phải hay trái chỉ là một ước lệ của con người. Không có gì cho ta phân biệt được một hiện tượng ở ngoài gương và hình

chiếu của hiện tượng đó trong gương, sự đảo ngược không gian $x \leftrightarrow - x$ không làm thay đổi những hiện tượng, chúng bất biến. Tháp rùa cổ kính soi hình xuống nước trong vắt như pha lê của Hồ Gươm mùa thu là ví dụ của đối xứng gương toàn vẹn, tháp với hình không thể phân biệt.

Khoảng đầu những năm 1950 thực nghiệm phát hiện một điều khó hiểu là meson K^+ lúc thì phân rã ra 2 pion, lúc ra 3 pion. Nếu lực yếu tuân thủ đối xứng gương thì đó là một nghịch lí vì tính chẵn lẻ nội tại[20] của K^+ (meson 0^-) buộc nó chỉ được phân rã ra 3 pion. Hai nhà vật lí Trung Quốc ở Mĩ là Lí Chính Đạo (T. D. Lee) và Dương Chấn Ninh (C. N. Yang), giải Nobel 1957, khi tìm hiểu và phân tích "nghịch lí" trên đã giả định là lực yếu vi phạm đối xứng gương P và đề xuất cách kiểm chứng giả thuyết này bằng thực nghiệm, trong đó spin đóng vai trò quyết định. Nhà nữ vật lí thực nghiệm Ngô Kiện Hùng (C.S. Wu), cùng ở Đại học Columbia với Lí Chính Đạo đã khám phá ra trong quá trình phân rã β của Cobalt phân cực là electron chỉ phát ra theo phía ngược chiều với trục phân cực của Cobalt[21]; rõ ràng có một bất đối xứng trong sự phân phối electron xung quanh trục phân cực, chứng minh lực yếu vi phạm toàn bộ đối xứng gương.

---

[20] Dưới sự đảo ngược không gian ba chiều $\mathbf{x} \rightarrow -\mathbf{x}$, tính chẵn lẻ nội tại (mang kí hiệu P) của một boson được đánh dấu là dương (nếu nó không thay đổi) hoặc là âm (nếu nó đổi dấu). Ví dụ một vectơ ba chiều **A** có tính chẵn lẻ P âm (viết tắt 1^-) vì **A** trở thành $-\mathbf{A}$ khi đảo ngược không gian. Trái lại tích vectơ $\mathbf{A}\times\mathbf{B}$ của 2 vectơ **A** và **B** là một vectơ trục (axial vector), nó có P dương (viết tắt 1^+) vì $\mathbf{A}\times\mathbf{B}$ không đổi dấu mà vẫn là $\mathbf{A}\times\mathbf{B}$ khi đảo ngược không gian. Tích vô hướng $\mathbf{A}.\mathbf{B}$ của hai vectơ **A** và **B** là một đại lượng vô hướng (scalar) có P dương, viết tắt 0^+. Trái lại $(\mathbf{A}\times\mathbf{B}).\mathbf{C}$ là một giả vô hướng (pseudo-scalar) có P âm, viết tắt 0^-. Để phân loại rõ các meson, ngoài spin $J = 0, 1...$ ra, chúng còn mang thêm tính chẵn lẻ P và mang kí hiệu J^P các meson π, K, D, B đều có J^P là 0^-, meson ρ, K^*, ϕ, J/ψ có J^P là 1^-, meson A_1 có J^P là 1^+, boson Higgs có J^P là 0^+. Hệ thống 2 pion trong trạng thái căn bản có tính chẵn lẻ dương, còn 3 pion có tính chẵn lẻ âm. Ngoài khối lượng, điện tích và spin, các meson còn có thêm kí hiệu J^P để xác định đặc trưng của nó.

[21] Cobalt nhúng vào nhiệt độ cực thấp trong một từ trường thì bị phân cực với vectơ phân cực **S**. Gọi **k** là vectơ xung lượng của electron phát ra trong quá trình phân rã β của Cobalt phân cực với spin **S**. Spin hay phân cực đóng vai trò quyết định trong phương cách tìm kiếm sự vi phạm đối xứng gương vì $\mathbf{S}.\mathbf{k}$ là một giả vô hướng, $\mathbf{S}.\mathbf{k} \rightarrow -\mathbf{S}.\mathbf{k}$ bởi sự đảo ngược không gian $\mathbf{x} \rightarrow -\mathbf{x}$. Tương quan giữa hai vectơ **S** và **k** là đại lượng giả vô hướng $\mathbf{S}.\mathbf{k}$, đối xứng gương bị vi phạm nếu $\mathbf{S}.\mathbf{k} \neq 0$.

Ngoài nhóm C.S.Wu, hai nhóm thực nghiệm khác là Leon Lederman và Valentine Telegdi cũng tìm ra lực yếu vi phạm đối xứng gương trong $\pi \rightarrow \mu + \nu$ tiếp theo bởi $\mu \rightarrow \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e$ với μ phân cực. Spin là momen góc nội tại, vậy nếu spin **s** của electron đi ngược chiều với xung lượng **k** trong phân rã β thì ta có thể hình dung như nó quay từ phải sang trái xung quanh trục của nó.

2- Một ví dụ khác là đối xứng vật chất-phản vật chất hay đối xứng *CP*, theo đó các định luật chi phối sự vận hành của vật chất và của phản vật chất phải giống hệt nhau. Chữ *C* trong *CP* chỉ điện tích vì sự hoán chuyển vật chất ↔ phản vật chất là thay đổi dấu của điện tích: $e^- \leftrightarrow e^+$. Cần nhấn mạnh là trong tất cả các hạt trung hòa điện tích, không phải lúc nào hạt và phản hạt cũng là một (như photon, meson π^0, ρ^0, η^0). Phần lớn những hadron trung hòa điện tích như neutron, meson K^0, baryon Λ^0, meson B^0 đều khác phản hạt của chúng.

Trường hợp của neutrino là rất đặc biệt vì nó là hạt cơ bản duy nhất trung hòa điện tích (quark và ba lepton e^-, μ^-, τ^- đều không thế), câu hỏi "neutrino và phản neutrino có khác nhau không?" chưa được thực nghiệm trả lời. Nếu chúng khác nhau thì chẳng có gì lạ, đơn giản là neutron khác phản neutron, và được gọi là neutrino Dirac. Nhưng nếu không, neutrino cũng chính là phản neutrino, thì chúng là neutrino Majorana. Tính chất của neutrino Majorana cực kì quan trọng vì nó vi phạm luật bảo toàn số lượng lepton mà hệ quả là sự hiện hữu của phân rã kép "0 neutrino": $n + n \rightarrow p + p + e^- + e^-$. Vế đầu n + n không có lepton, vế sau có hai electron, vậy số lượng lepton không bảo toàn. Nếu neutrino là loại Dirac thì phân rã β kép phải kèm theo hai $\bar{\nu}_e$: $n + n \rightarrow p + p + e^- + e^- + \bar{\nu}_e + \bar{\nu}_e$, với hai $\bar{\nu}_e$ (phản lepton) và hai e^- (lepton) ở vế sau thì số lượng lepton được bảo toàn.

Nếu phân rã β kép "0 neutrino" được thực nghiệm phát hiện thì chắc chắn sẽ là một bước ngoặt của ngành vật lí hạt vì nó vượt ra ngoài khuôn khổ của SM, thuyết này sẽ phải mở rộng sang một hệ hình mới.

Năm 1964, James Cronin và Van Fitch cùng hai cộng sự viên phát hiện ra vi phạm đối xứng *CP* của meson K^0_L trung tính (K^0_L chỉ phân rã ra 3 pion nếu lực yếu tuân thủ *CP*, nhưng nó cũng phân rã ra 2 pion, tuy ít xảy ra hơn, và như vậy vi phạm *CP*) và hai người nhận giải Nobel năm 1980. Sự vi phạm đối xứng *CP* của lực yếu được xác nhận sau đó bởi nhiều thực nghiệm khác nhau liên quan đến các hadron K (mang *kì tính*) và B (mang *đáy tính*). Ba tương tác cơ bản *phi* hấp dẫn, lực điện-từ và hạt nhân mạnh đều tuân thủ phép đối xứng gián đoạn *P* và *CP*, chỉ lực hạt nhân yếu mới

vi phạm chúng, tối đa với đối xứng P, đôi chút với đối xứng CP, tương tác yếu của hạt và của phản hạt khác nhau ở mức độ vừa phải.

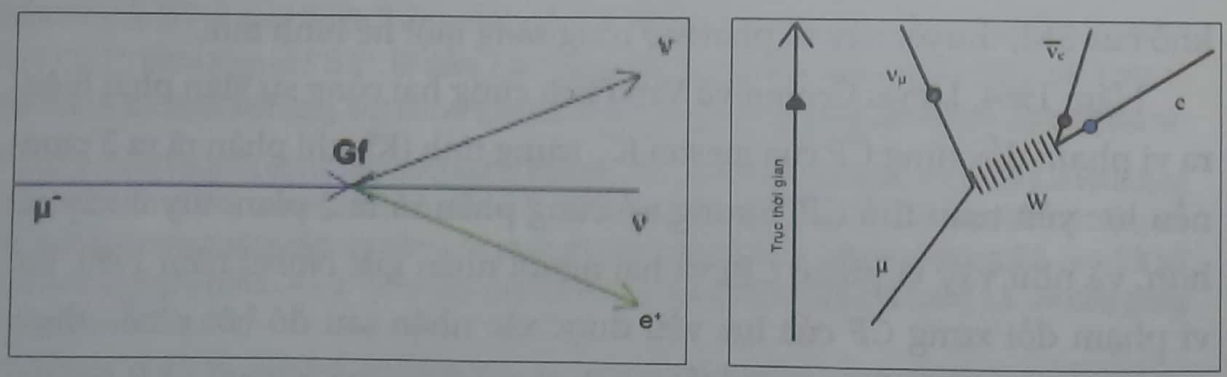
3- Cho đến đầu những năm 1970, trước khi SM được hoàn tất, lực yếu[22] được tiếp cận từ góc độ mang tính chất tạm thời và hiệu dụng gọi là thuyết

---

[22] Phương trình diễn tả lực yếu "thời tiền SM" là thuyết Fermi. Trong những công trình của Enrico Fermi (cha đẻ của phản ứng dây chuyền Uranium, tiền thân của bom hạt nhân A), nhiều nhà vật lí cho rằng đóng góp quan trọng nhất của ông là đã phỏng theo lực điện-từ để đề xuất dạng của lực yếu, dấu ấn này vẫn còn mãi tới nay mặc dù đã có nhiều thay đổi về cấu trúc.

Mô phỏng định luật điện-từ là tích số của dòng điện electron $e\,\overline{\psi}(x)\gamma^{\mu}\psi(x)$ với trường photon $A_{\mu}(x)$, Fermi đề xuất định luật phân rã β của $n \to p + e^{-} + \bar{\nu}$ cũng là tích số *dòng lực yếu* proton-neutron $\overline{\psi}_{p}(x)\gamma^{\mu}\psi_{n}(x)$ với *dòng lực yếu* neutrino-electron $\overline{\psi}_{\nu}(x)\gamma_{\mu}\psi_{e}(x)$, vậy mô hình của lực yếu theo Fermi là $\{\overline{\psi}_{p}(x)\gamma^{\mu}\psi(x)_{n}\}\{\overline{\psi}_{\nu}(x)\gamma_{\mu}\psi(x)_{e}\}$ với hằng số $G_F \approx 1.17 \times 10^{-5}/\text{GeV}^2$ lấy từ thực nghiệm. Ma trận γ^{μ} mang tính chất vectơ viết gọn là V ($J^P = 1^-$), và vì tích số V.V là vô hướng 0^+ nên thuyết Fermi tuân theo đối xứng gương. Khi thực nghiệm chứng minh sự vi phạm đối xứng gương thì Marshak, Sudarshan, Feynman, Gell-Mann, Sakurai nhận thấy chỉ cần thay thế γ^{μ} bằng $\gamma^{\mu}(1-\gamma_5)$ trong mô hình Fermi là đủ đáp ứng sự vi phạm này, vì $\gamma^{\mu}\gamma_5$ mang tính chất vectơ trục $J^P = 1^+$. Từ nay sự thay đổi đó mang tên (V – A) phản ánh cấu trúc $\gamma^{\mu}(1-\gamma_5)$, tích số (V – A).(V – A) hòa hợp cả hai thành phần tuân theo và vi phạm đối xứng gương: tuân theo do V.V + A.A (mang tính 0^+) và vi phạm do V.A + A.V (mang tính 0^-). Dấu trừ trong (V–A) hàm ý các hạt khi phân rã đều có spin ngược chiều với xung lượng, spin quay về phía trái (chú thích 21). Cấu trúc (V – A) là tính chất căn bản của lực yếu do thực nghiệm phát hiện, sau này SM vẫn phải dựa vào nó để xây dựng thuyết điện-yếu.

Tuy nhiên cần nhấn mạnh là dù dưới dạng V.V hay (V – A).(V – A) thì định luật hiệu dụng Fermi như tích số của 2 dòng yếu vẫn tự mâu thuẫn ở năng lượng cao $E \geq 600$ GeV. Nguyên nhân của mâu thuẫn này là thuyết Fermi diễn tả tác động của 4 fermion (tích số của hai dòng yếu $(\mu\text{-}\nu_{\mu})\times(e\text{-}\nu_{e})$ mỗi dòng có 2 fermion) hội tụ ở cùng một không-thời điểm x (phía trái Hình f), gây ra mọi phân kì ở năng lượng cao. Đó cũng là nguyên nhân khiến thuyết này *không tái chuẩn hóa* được; càng triển khai bao nhiêu lũy thừa của hằng số tương tác yếu G_F thì ta lại càng gặp bấy nhiêu kết quả phân kì, những con số vô hạn cứ liên tục xuất hiện, không thể xử lí nổi.



Hình f: Phía trái, 4 fermion tụ ở chung một điểm (thuyết Fermi). Phía phải, 4 fermion tách ra bởi boson chuẩn W thành 2 dòng $\mu\text{-}\nu_{\mu}$ và $e\text{-}\nu_{e}$, mỗi dòng có 2 fermion (thuyết SM). Phía phải thành phía trái khi $M_W \to \infty$.

Fermi. Thực vậy, mặc dù thuyết này diễn tả chính xác những quá trình phân rã ở năng lượng thấp, nhưng ở năng lượng cao $E \geq 600$ GeV, nó tự mâu thuẫn. Nguyên nhân của nghịch lí này là do thuyết Fermi chủ yếu diễn tả tác động của 4 fermion tụ chung ở một điểm x (chú thích 22). Vì tụ chung ở một điểm nên biên độ tương tác của chúng tính ra là $G_F E^2$, nhưng nếu $E \geq 600$ GeV thì biên độ này có xác suất ≥ 1, điều tối kị.

Cách giải quyết nghịch lí nói trên là xem lực yếu có tuân theo một phép đối xứng chuẩn nào không, nếu có thì định luật cơ bản của lực yếu tránh được khuyết điểm của thuyết Fermi (do hàm truyền của boson trung gian W nên 4 fermion không tụ ở một điểm mà tách ra ở 2 điểm, xem Hình f ở chú thích 22), do đó có nhiều khả năng lực yếu cũng được hoàn chỉnh như lực điện-từ. Nhưng lại nảy sinh một vấn đề hóc búa là giống như photon của điện-từ, đối xứng chuẩn buộc boson truyền tải lực yếu *W* phải không có khối lượng[23], điều này trái ngược với thực nghiệm[24].

Giải quyết thỏa đáng nghịch lí trên là cả một bước ngoặt lịch sử trong tiến trình khám phá SM vì cần phải vượt qua hai giai đoạn gần như mâu thuẫn: (a) xác nhận định luật của lực yếu là lí thuyết chuẩn Yang-Mills và (b) phá vỡ phép đối xứng chuẩn để mang khối lượng cho boson chuẩn của lực yếu. Nói nôm na là một viên đá ném trúng cả hai đích: vừa có đối xứng chuẩn vừa có khối lượng cho boson chuẩn! Vậy sự phá vỡ đối xứng chuẩn phải *tự phát*, không bị phá vỡ toàn phần mà chỉ cục bộ vì bị che lấp bởi hệ thống vật chất trong trạng thái căn bản.

IVc. Mấy dặm sơn khê

Trước khi đi xa hơn trong quá trình vượt khỏi thuyết Fermi để đặt nền tảng nhất quán cho lực yếu qua hai giai đoạn nói trên, chúng ta hãy tóm tắt những nét chính của lực này:

---

[23] Tham khảo chú thích 18 trong đoạn III: Sắc động học lượng tử, QCD.

[24] Lực yếu có một độ dài tác động R_W rất nhỏ, hạn chế trong hạt nhân nguyên tử. Theo nguyên lí bất định thì boson trung gian truyền tải lực yếu phải có khối lượng M_W rất lớn, $M_W \sim \hbar / cR_W$.

1- Khi quan sát và phân tích những hiện tượng xảy ra bởi tác động của lực yếu, có mấy đặc tính sau đây cần nhấn mạnh:

• thứ nhất là dòng lực yếu thay đổi điện tích khi phân rã β, ví dụ $n \to p$, $\pi^+ \to \pi^0$ của hadron, tượng trưng bởi $d \to u$ của quark và $\mu^- \to \nu_\mu$ của lepton;

• thứ hai là những hadron mang hương vị (như kì tính) khi phân rã và thay đổi điện tích như $\Lambda^0 \to p$, $K^0 \to \pi^+$ (tượng trưng bởi $s \to u$) đều có cường độ khá nhỏ khoảng 5% so với phân rã của những hadron bình thường không hương vị như $n \to p$, $\pi^+ \to \pi^0$ (tượng trưng bởi $d \to u$).

Để giải thích những hiện tượng này, thay vì có hai loại quark phân rã biệt lập $d \to u$ và $s \to u$, Nicola Cabibbo đề xuất là hai quark d và s hỗn hợp bởi góc θ_c khi phân rã ra quark u theo như sơ đồ $(d \cos\theta_c + s \sin\theta_c) \to u$, khác với các lepton không hỗn hợp như $\mu^- \to \nu_\mu$.

So sánh $s \sin\theta_c \to u$ với $d \cos\theta_c \to u$, con số $5\% \approx (0.22)^2 = \tan^2\theta_c$ phản ánh chính xác cường độ phân rã của kì tính $\Lambda^0 \to p$, $K^0 \to \pi^+$ so với $n \to p$, $\pi^+ \to \pi^0$ của hadron không hương vị.

Vì $\cos^2\theta_c \approx 0.95$, sự phân rã của hadron $n \to p$ (tương ứng với $d \cos\theta_c \to u$) phải nhỏ hơn một chút phân rã của lepton $\mu^- \to \nu_\mu$, điều được xác định bởi thực nghiệm.

Vì K^0 và $\overline{K}^0$ đều phân rã ra 2 hoặc 3 pion, $K^0 \to$ pion $\to \overline{K}^0$ nên hệ quả là phải có sự chuyển biến vật chất trở thành *phản* vật chất mà $K^0 \leftrightarrow \overline{K}^0$ là một ví dụ. Tuy nhiên tính toán theo thuyết Fermi đưa đến kết quả bất ngờ là chuyển biến vật chất ↔ phản vật chất lớn hơn đo lường thực nghiệm vài ngàn lần.

Ngoài ra còn một điều khó hiểu nữa là những loại phân rã *trung tính* đổi hương vị (flavor changing *neutral* current), tượng trưng bởi $s \to d$, đều rất hiếm so với những loại phân rã *điện tích* đổi hương vị (flavor changing *charged* current), ví dụ $K^0 \to \mu^+ + \mu^-$ ít hơn khoảng 10^{-4} so với $K^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$ mà tiên nghiệm thì không thấy chúng tại sao lại khác nhau quá như vậy.

Để giải quyết những nghịch lí này, năm 1970 Glashow, Iliopoulos, Maiani (cơ chế GIM) đề xuất là phải tồn tại một loại quark thứ tư mới lạ gọi là quark duyên c trực giao với quark u theo như sơ đồ $(s \cos\theta_c - d \sin\theta_c) \to c$ kèm theo $(d \cos\theta_c + s \sin\theta_c) \to u$ để phần nào triệt tiêu loại phân rã *trung tính* đổi hương vị $s \to d$. Hơn nữa, sự triệt tiêu này có thể tính toán thành

hiệu số giữa khối lượng của hai quark *c* và *u*, do đó khối lượng của $c \approx 1.5$ GeV/c^2 đã được tiên đoán trước khi phát hiện quark duyên tháng 11 năm 1974 đồng thời ở Stanford và Brookhaven với hạt $J/\psi(3.1)$ và một loạt các hạt charmonium khác. Phát hiện này được gọi là cuộc cách mạng tháng 11 của vật lí hạt vì nó mở đầu cho SM thăng hoa.

2- Như đã trình bày, lực yếu vi phạm đối xứng *CP*, tương tác yếu của vật chất và của phản vật chất khác nhau. Trong bối cảnh sơ khai của vật lí hạt những năm 1973, hai nhà vật lí Nhật Bản Makoto Kobayashi và Toshihide Maskawa (KM), giải Nobel 2008, đã tiên phong tìm hiểu cơ chế nào cho phép sự vi phạm này. Trước hết KM nhận ra là hỗn hợp của các quark không chỉ là một tiền đề ad-hoc đưa ra bởi Cabibbo[25] mà cần phải mở rộng thành ma trận 2×2 với những hệ số ($\cos\theta_c$, $\sin\theta_c$) trực giao với ($-\sin\theta_c$, $\cos\theta_c$) qua đó GIM tiên đoán quark *duyên*. Sau nhiều cuộc vật lộn với toán "ứng dụng", hai ông đã tìm ra là ma trận unita 2x2 nói trên chỉ có hệ số thực nên không thể vi phạm đối xứng *CP*. Thực vậy, sự vi phạm *CP* chỉ có thể xảy ra nếu ma trận unita hỗn hợp quark có hệ số phức[26]. KM chứng minh là nếu có N cặp quark phân rã thì ma trận N×N có hệ số phức nếu $(N-1)(N-2) \geq 2$, vậy $N \geq 3$. Ít nhất phải có ba cặp hay sáu quark để cho đối xứng *CP* bị vi phạm.

---

[25] Sự hỗn hợp của hai neutrino ν_e và ν_μ được đề xuất bởi trường phái Nagoya ở Nhật Bản: Ziro Maki, Masami Nakagawa, Shoichi Sakata vào năm 1962 trước khi Cabibbo đề xuất hỗn hợp của quark vào năm 1963.

[26] Phân rã β bởi lực yếu (điện tích thay đổi một đơn vị *e*, ví dụ điển hình là neutron → proton) có thể diễn tả bằng quark. Gọi 3 quark điện tích $+(2/3)e$ là Q_i với $i = 1, 2, 3$ đại diện cho *u*, *c*, *t*, và 3 quark điện tích $-(1/3)e$ là q_j với $j = 1, 2, 3$ đại diện cho *d*, *s*, *b*. Phân rã $Q_i \to q_j$ viết ngắn gọn là $U_{ij}Q_iq_j$. Hỗn hợp các quark bởi ma trận 2×2 theo như $(\cos\theta_c\, d + \sin\theta_c\, s) \to u$ và hỗn hợp trực giao $(\cos\theta_c\, s - \sin\theta_c\, d) \to c$ mở rộng thành ma trận unita 3×3, U_{ij} gọi là ma trận CKM (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa) với đường chéo $U_{i=j} \approx 1$; $U_{12} \approx -U_{21} \approx \sin\theta_c$; $U_{23} \approx -U_{32} \approx (\sin\theta_c)^2$; $U_{13} \approx U_{31} \approx (\sin\theta_c)^3$. Khi phân tích các hiện tượng phân rã của các hadron mang kì tính, Cabibbo tìm ra $\sin\theta_c \approx 0.22$.
(i) Chính sự trực giao giữa hai quark *u* và *c* ($U_{12} \approx -U_{21} \approx \sin\theta_c$) làm cho đóng góp của *u* bị triệt tiêu bởi đóng góp của *c* và sự triệt tiêu này giải thích tại sao những loại phân rã *trung tính đổi hương vị* như $K^0 \to \mu^+ + \mu^-$ lại hiếm khoảng 10^{-4} so với những loại phân rã *điện tích đổi hương vị* như $K^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$.
(ii) Vi phạm đối xứng *CP* được thể hiện qua một pha $\delta \neq 0$ của ma trận unita U_{ij}. Thực thế nếu biên độ phân rã của vật chất là T thì biên độ phân rã của phản vật chất là T^*, vi phạm đối xứng CP nghĩa là $T \neq T^*$, vậy phần ảo của T (pha δ của ma trận CKM) phải là $\delta \neq 0$. Ma trận unita $N \times N$ có pha $\delta \neq 0$ nếu $(N-1)(N-2) \geq 2$, hay $N \geq 3$, vậy phải có ít nhất ba cặp Q_i-q_j hay sáu quark mới vi phạm được đối xứng CP.

Từ đây ra đời ma trận phức unita 3×3 CKM, một thành phần cơ bản trong cấu trúc của lực yếu.

Thực là một trí tưởng tượng phong phú vì khi ấy quark chỉ là một giả thuyết, một đề tài tế nhị, bị nhiều người bài bác kể cả những cây đại thụ như S.Weinberg, và ngay cả nếu giả thuyết quark được chấp nhận thì cho đến lúc đó người ta mới chỉ biết đến ba quark *u, d, s*, có thể thêm *c* nữa là bốn quark. Thực nghiệm liên tiếp sau này chứng tỏ sự đúng đắn, chính xác của cơ chế vi phạm *CP* mà KM đề xướng. Năm 1974 quark *duyên* được tìm thấy, rồi quark *đáy* (năm 1977) và quark *đỉnh* (năm 1994).

Khám phá của GIM và KM góp phần cực kì quan trọng cho sự hình thành của SM. Chính sáu quark trong Hình 1 sắp dọc theo ba cặp quark (*u-d, c-s, t-b*) đã thể hiện tất cả những đặc trưng của lực yếu với ma trận 3×3 CKM hỗn hợp ba cặp quark nói trên. Sáu lepton cũng sắp dọc theo từng cặp (e^--ν_e, μ^--ν_μ, τ^--ν_τ) nhưng với ma trận hỗn hợp của các lepton (khác với ma trận CKM hỗn hợp của các quark) để diễn tả sự hoán chuyển giữa 3 loại neutrino $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ đã được đề cập ở Phần IV.

Bài học rút ra từ đó là giữa trăm ngàn các hiện tượng vật lí rối rắm, điều quan trọng là biết nhận xét, phân tích dữ kiện, phân biệt cái chính cái phụ và đặt ra những câu hỏi cốt lõi có nội dung bao quát, tổng quan. Khởi đầu các tác giả đều tập trung nghiên cứu những đặc trưng của lực yếu: kì tính biến hóa và vi phạm đối xứng *CP*, hệ quả lại bất ngờ chuyển sang địa hạt của lực mạnh với sự phát hiện ra ba loại quark vật chất mới lạ là *duyên*, *đáy* và *đỉnh*. Ai đó đã nói đúng "đặt trúng vấn đề là đã giải quyết được nửa phần rồi".

IVd. Lực yếu xuất phát từ đối xứng chuẩn Yang-Mills

1- Khoảng những năm đầu 1950, nhiều nhà vật lí (trong đó có Sidney Bludman, John Clive Ward) đã tinh ý nhận ra là giữa hai tương tác điện-từ và yếu có nhiều cấu trúc và tính chất đồng nhất, vậy sẽ là đương nhiên khi sử dụng phương pháp rất hiệu lực của đối xứng chuẩn trong điện-từ để khám phá những định luật vận hành của lực yếu.

Đặc thù của lực yếu là sự phân rã β theo đó các cặp quark hay lepton thay đổi một đơn vị điện tích. Lấy trường hợp của cặp lepton ν_e và e^- (hay

cặp quark *u* và *d*) làm ví dụ. Dưới tác động của lực yếu, chúng thay đổi điện tích $e^- \leftrightarrow \nu_e$ (hay $u \leftrightarrow d$) với cấu trúc vectơ "quay về trái" (V- A) của dòng lực yếu giữa hai đối tượng ν_e và e^- (chú thích 22). Vậy gần như đương nhiên là nhóm đối xứng đáp ứng tính bất biến của lực yếu bởi sự hoán chuyển của hai đối tượng ν_e và e^- chính là nhóm SU(2) trong thuyết Yang-Mills (xem phần IIIb), chỉ cần thay thế cặp p-n thành cặp ν_e-e^-.

Nói chung, nhóm đối xứng SU(N) hoán chuyển N vật bằng (N^2-1) ma trận N×N, tương ứng với (N^2-1) boson chuẩn nối kết N vật này. Vậy nhóm đối xứng chuẩn SU(2) của lực yếu có 3 boson chuẩn W^+, W^-, W^3 nối kết $e^- \to \nu_e + W^-$, $\nu_e \to e^- + W^+$, $\nu_e \to \nu_e + W^3$, $e^- \to e^- + W^3$. Sự xuất hiện của boson W^3 và dòng lực yếu *trung hòa điện tích* $e^- \to e^- + W^3$ gợi ra mối liên hệ nào đó với dòng lực điện-từ quen thuộc của electron $e^- \to e^- + \gamma$, cái khác nhau duy nhất giữa chúng là dòng lực yếu có cấu trúc vectơ (V-A) "quay về trái", trong khi dòng lực điện-từ chỉ có cấu trúc vectơ V.

Còn quá trình với neutrino: $\nu_e \to \nu_e + W^3$ thì hoàn toàn mới lạ vì trước đó ta chỉ biết lực yếu thay đổi điện tích của các hạt như $e^- \to \nu_e$ hay $\nu_e \to e^-$.

Để chứng minh tính đúng đắn của thuyết Yang-Mills khi dùng nhóm đối xứng chuẩn SU(2), việc đầu tiên là kiểm chứng xem có tán xạ *"không thay đổi điện tích"* chăng. Tán xạ *"thay đổi điện tích"* là bình thường vì dòng lực yếu thay đổi điện tích (mà $\nu_e \to e^-$ là ví dụ), nhưng *"không thay đổi điện tích"* thì hoàn toàn mới lạ. Nhóm thực nghiệm Gargamelle ở CERN năm 1973 đã đưa ra kết quả ν_e + nucleon → ν_e + hadron *"không thay đổi điện tích"*, đúng như tiên đoán của thuyết điện-yếu. Đây là một sự kiện lịch sử của vật lí hạt, chứng tỏ SM với thuyết Yang-Mills đã đi đúng hướng.

Và đây là điểm then chốt trong tiến trình xây dựng cấu trúc của SM: khi lực yếu bị chi phối bởi đối xứng SU(2) thì các cặp đôi lepton hay quark (ν_e và e^-, *u* và *d* như vài ví dụ) đều có spin đồng vị $\mathbf{I} = 1/2$, và như vậy đẳng thức phổ quát GNN mà ta đã làm quen ở IIc đương nhiên đóng vai trò hướng dẫn cho sự hợp nhất của hai lực điện-từ và hạt nhân yếu vì cả hai lực đều có chung cấu trúc $Q = I_z + Y/2$.

Vì boson W^3 là thành phần thứ ba tương ứng với $I_z \neq 0$ nên Glashow (năm 1960) và sau đó Salam, Weinberg (năm 1967) nhận định là phải có thêm

một boson mới lạ $\underline{X}$ tương ứng với siêu tích $Y/2$, cả W^3 và $\underline{X}$ đều trung hòa điện tích. Sự liên quan giữa hai lực điện-từ và yếu được thực hiện bằng sự hỗn hợp[27] tự nhiên (qua một thông số góc θ_w) giữa hai boson: W^3 của I_z và $\underline{X}$ của $Y/2$, hoặc là giữa hai boson chuẩn: Z của lực yếu và photon γ của lực điện-từ. Hơn nữa cường độ của hai lực yếu và điện-từ cũng liên kết qua góc θ_w.

Cho đến giai đoạn xây dựng cấu trúc liên kết hai lực điện-từ và yếu qua thuyết Yang-Mills SU(2)× U(1) này, tất cả bốn boson chuẩn (ba của lực yếu W^+, W^-, Z và một của lực điện-từ γ) *đều không có khối lượng* vì chúng tuân theo đối xứng chuẩn.

2- Giai đoạn tiếp theo là làm sao mang khối lượng rất lớn cho W^+, W^-, Z của lực yếu để phù hợp với thực nghiệm, trong khi photon γ của lực điện-từ vẫn giữ khối lượng bằng 0? Thách thức này được giải đáp bởi cơ chế mang tên *Phá vỡ tự phát tính Đối xứng* (Spontaneous Breaking of Symmetry, SBS) do Yoichiro Nambu (giải Nobel 2008) mở đường khai sáng.

Trong vật lí, cũng như nhiều ngành khác, có một số ít nhà khoa học có kiến thức liên ngành uyên thâm, có thể mở rộng tầm nhìn ra ngoài chuyên môn của mình, tìm hiểu những gì phổ quát để mang đến cho ngành mình một luồng gió mới. Nhà vật lí Nhật Bản Nambu ở Đại học Chicago là một trong số đó. Là chuyên gia về hạt cơ bản nhưng ông cũng lưu tâm và có cái nhìn bao quát về hiện tượng Siêu dẫn điện-từ khác lạ với Vật lí hạt. Ông xét thấy có cái gì liên kết hai ngành - cấu trúc toán học thì giống nhau nhưng vật lí thì lại khác biệt - và nhận ra được tính chất đặc thù của SBS mà hiện tượng siêu dẫn là một ví dụ tiêu biểu.

Mô phỏng hiện tượng SBS, Peter Higgs và đồng nghiệp đã sáng tạo ra cơ chế BEH (Brout, Englert, Higgs)[28] bằng cách giả định là phải có một

---

[27] Hai boson trung hòa điện tích W^3 và $\underline{X}$ của GNN là hỗn hợp giữa boson chuẩn Z của lực yếu với photon γ của điện-từ:

$$W^3 = \cos\theta_w Z + \sin\theta_w \gamma \; ; \underline{X} = \cos\theta_w \gamma - \sin\theta_w Z$$

Cường độ của lực điện-từ (diễn tả bởi $\alpha_{em} \approx 1/137$) và của lực yếu (diễn tả bởi hằng số Fermi $G_F \approx 1.17 \times 10^{-5}$/ GeV^2) được liên kết bởi hệ thức $(\sin\theta_w M_W)^2 = (\pi\alpha_{em})/(G_F\sqrt{2})$. Khối lượng của 2 boson chuẩn W và Z cũng liên kết bởi $M_W = \cos\theta_w M_Z$.

[28] Thực ra có sáu người trong ba nhóm độc lập với nhau gần như đồng thời cùng đề xuất cơ chế mang khối lượng

trường ϕ (x) vô hướng gọi là trường Higgs tác động lên các boson chuẩn để mang khối lượng cho chúng. Nguyên nhân nào thúc đẩy Nambu nhận ra SBS và sáu nhà vật lí đề xuất cơ chế BEH? Đó là sự tìm hiểu tại sao hạt ánh sáng (photon γ) không khối lượng lại trở thành có khối lượng khi nó di chuyển trong các vật liệu siêu dẫn điện-từ.

Sau đó Abdus Salam và Steven Weinberg (giải Nobel 1979) đã dùng cơ chế BEH để xây dựng nên thuyết điện-yếu, tiên đoán sự tồn tại của boson Z với dòng lực yếu trung hòa điện tích mà biểu hiện đặc trưng nhất là sự tán xạ đàn hồi của neutrino được khám phá bởi thực nghiệm Gargamelle[29] ở CERN vào năm 1973.

Tuy $W^{\pm}$, Z có khối lượng nhưng khối lượng này không phá vỡ đối xứng chuẩn SU(2) của lực yếu, đối xứng chỉ bị thu hẹp, che khuất bởi hệ thống vật chất trong chân không (trạng thái có năng lượng cực tiểu), tương tự như photon tuy có khối lượng ở trạng thái siêu dẫn điện-từ (hiệu ứng Meissner) nhưng đối xứng chuẩn U(1) của lực điện-từ đâu có bị phá vỡ trong toàn thể.

IVe. Sự phá vỡ tự Phát tính Đối xứng

1- Vài khái niệm sơ lược: Cần phân biệt hai điều quan trọng khi bàn về tính đối xứng: một là định luật vật lí diễn tả bởi phương trình, hai là trạng thái của hệ thống vật lí diễn tả bởi nghiệm số của phương trình trên. Sự

---

cho boson chuẩn (lúc ấy chưa có internet để họ có thể đưa ngay bài viết lên mạng như ngày nay các nhà nghiên cứu thường làm). Nhóm thứ nhất gồm Robert Brout và François Englert, xuất bản ngày 31/08/1964; nhóm thứ hai chỉ có Peter Higgs, xuất bản ngày 19/10/1964; nhóm thứ ba gồm Gerard Guralnik, Carl Hagen và Thomas Kibble, xuất bản ngày 16/11/1964. Tất cả đều trên tạp chí *Phys. Rev. Lett.* số 13.

Bài của Higgs thực ra được gửi từ cuối tháng 7 năm 1964 trước cho tạp chí *Phys. Lett.* ở CERN, nhưng bị từ chối nên ông đã gửi cho *Phys. Rev. Lett.* Người thẩm định bài của Higgs cho *Phys. Rev. Lett.* chính là Nambu.

Cần nhấn mạnh là chỉ riêng Peter Higgs đã đề xuất là phải hiện hữu hạt cơ bản mang spin 0, và như vậy cơ chế BEH có thể kiểm chứng bởi thực nghiệm. Weinberg gọi hạt này là boson Higgs. Trường ϕ(x) có bốn thành phần $\phi^{\pm}$, ϕ^0, $(\phi^0)^*$, ba trong bốn thành phần này trở thành ba boson NG để mang cho ba boson chuẩn W^+, W^-, Z^0 khối lượng. Thành phần cuối, vì trực giao với photon nên không mang khối lượng cho nó, chính là boson Higgs với khối lượng 125 GeV/c^2 mà LHC vừa tìm thấy dấu vết ngày 4 tháng 7 năm 2012.

[29] Nhà vật lí Nguyễn Khắc Ứng là một trong các tác giả của nhóm Gargamelle đã khám phá ra dòng lực yếu trung hòa điện tích, tiền thân của boson chuẩn Z; *Phys. Lett.* 46B (1973), 138.

phá vỡ tự phát của tính đối xứng hàm ý là định luật (hay phương trình) mang một phép đối xứng nào đó, trong khi nghiệm số của phương trình ấy lại không có cái đối xứng nguyên thủy, tính đối xứng bị thu hẹp lại nhưng không mất đi trong hệ thống vật chất. Tìm ra phương trình (hay định luật vật lí) là một chuyện, còn giải được để có nghiệm số thỏa mãn điều kiện ban đầu nào đó lại là chuyện khác. Ở đây điều kiện ban đầu là năng lượng cực tiểu và nghiệm số tương ứng gọi là trạng thái căn bản hay chân không. Đối xứng bị phá vỡ một cách tự phát nếu phương trình diễn tả định luật vật lí đối xứng nhưng trạng thái căn bản thì không. Đối xứng ***không*** bị phá vỡ hoàn toàn mà nó chỉ bị thu hẹp, che khuất bởi vật chất trong trạng thái căn bản.

Một ẩn dụ cụ thể minh họa cho điều nói trên: ấn đầu một thanh gỗ dẻo đặt thẳng đứng trên bàn, lực ấn có đối xứng hoàn toàn so vào trục thẳng Oz của thanh gỗ trước khi bị ấn, lực này không ưu đãi bất kì một mặt phẳng thẳng đứng nào trong không gian ba chiều. Nhưng hệ thống vật chất (thanh gỗ bị ấn) sẽ bị cong đi, khi cong như vậy thanh gỗ tự nó đã nằm trong một mặt phẳng thẳng đứng cụ thể nào đó, hệ thống vật chất chỉ đối xứng trong mặt phẳng hai chiều, nó không còn mang tính đối xứng nguyên thủy của lực trong không gian ba chiều.

Cần tránh sự hiểu nhầm ý nghĩa giữa một bên là SBS theo đó đối xứng *không bị phá vỡ* (chỉ có trạng thái vật chất là bất đối xứng) và bên kia là những đối xứng khác *thực sự bị phá vỡ* như đối xứng gương (*P*), đối xứng vật chất-phản vật chất (*CP*) hay đối xứng hương vị $SU_F(3)$. Sự hiểu lầm này ngay cả W. Heisenberg và S. Weinberg ban đầu cũng mắc phải, hai ông đã coi SBS như một đối xứng xấp xỉ, bị phá vỡ thực sự.

2- Vì trạng thái căn bản được coi là trạng thái đối xứng hoàn hảo nhất, nó bất biến bởi mọi chuyển đổi nên ta có thể nghĩ rằng chỉ có duy nhất một *trạng thái căn bản* hay *chân không*, được định nghĩa như trạng thái vật chất có năng lượng tối thiểu. Nhưng có nhiều trường hợp không phải như vậy, có thể có muôn vàn trạng thái cơ bản tương đương nhau, không thể phân biệt, ta phải chọn cụ thể một trạng thái nhất định nào đó để xác định chân không. Tính đối xứng không bị phá vỡ trong toàn thể, nhưng bị phá vỡ một phần nào trong chân không, đó là SBS với Hình 9 như một ẩn dụ.

Hình 9. Hiện tượng SBS qua một ẩn dụ: Thế giới hoàn toàn đối xứng xung quanh trục thẳng đứng, khi em nhỏ nhìn từ đỉnh cao chót (nhưng bấp bênh) của nón. Sàn dưới vành nón (trạng thái căn bản) vững chắc nhưng xa trục thẳng đứng, đối xứng thu hẹp trong vành nón đối với em nhỏ nằm trên đó. Nằm trong vành nón, em nhỏ không ngờ là có một đối xứng khác ở đỉnh nón.

Hiện tượng SBS khá phổ biến trong vật lí mà vật liệu *sắt-từ* (kim loại sắt hay kền) là một ví dụ. Định luật cơ bản chi phối chất *sắt-từ* thì hoàn toàn đối xứng trong sự phân phối spin (coi như những la bàn nhỏ xíu) của các nguyên tử kền. Spin song song của chúng không có một chiều hướng nào giữ ưu thế trong toàn bộ không gian ba chiều. Nhưng trong một thỏi nam châm của vật liệu sắt-từ, nghĩa là trong trạng thái căn bản của các nguyên tử kền, thì spin song song của các nguyên tử này chỉ có một chiều nhất định bắc nam, vậy trạng thái vật chất chỉ còn đối xứng thu hẹp trong đó.

Cũng vậy, siêu dẫn điện-từ minh họa hiện tượng SBS. Tính siêu dẫn của một số vật liệu ở nhiệt độ thấp là một đặc trưng của vật lí lượng tử, nó không có điện trở, vì thế nó đẩy ra bất kì điện trường lớn nhỏ nào ở ngoài áp đặt vào nó. Hơn nữa, để gần vật liệu siêu dẫn thì thỏi nam châm bị đẩy ra ngoài, từ trường bị loại khỏi vật liệu siêu dẫn, đó là hiệu ứng Meissner-Ochsenfeld. Hiệu ứng này có thể ứng dụng cho xe lửa được nâng lên trên đường ray khi chạy (tàu đệm từ), không bị lực ma sát nên xe lửa chạy nhanh hơn. Như vậy vật liệu siêu dẫn ngăn chặn tầm truyền của trường điện-từ, nó là một hệ thống vật chất trong đó photon chỉ có thể tác động trong một khoảng cách ngắn, khác với bản chất tự tại của sóng điện-từ có thể truyền đi vô hạn. Khi chuyển động trong vật liệu siêu dẫn thì photon, boson chuẩn của điện-từ, bị cản bởi một bức tường chắn và như vậy photon

tác động *giống như mang một khối lượng* (chú thích 4 của IIb), mặc dù phương trình Mawwell của điện-từ vẫn tuân theo đối xứng chuẩn.

Bức tường chắn đó trong lí thuyết siêu dẫn của John Bardeen, Leon N. Cooper và Robert Schrieffer (BCS), giải Nobel 1972, là trạng thái căn bản của hệ thống vật chất với muôn ngàn cặp Cooper, cặp liên kết hai electron có spin đối nghịch nên mang spin 0. Mỗi cặp Cooper mang điện tích $2e$ nhưng vì có spin 0 nên những cặp này có thể cùng tồn tại tựa như một ngưng tụ Bose-Einstein. Mỗi electron thì cô đơn và có cá tính mạnh mẽ (thống kê Fermi-Dirac), nhưng thật kì lạ, trong điều kiện đặc biệt (nhiệt độ thấp) chúng lại dễ tạo thành từng cặp, mỗi cặp tuy mảnh mai nhưng khi tập hợp lại trở thành một dòng chảy lớn với muôn ngàn điện tích và trở nên siêu dẫn.

Mặc dù trong môi trường siêu dẫn, photon có khối lượng khác 0, đối xứng $\Psi(x) \rightarrow e^{ie(x)}\,\Psi(x)$ trong định luật điện-từ không bị phá vỡ mà chỉ thu hẹp bởi $\Psi(x) \rightarrow -\Psi(x)$ với hệ quả là sự xuất hiện ở trạng thái căn bản các cặp chẵn electron đối nghịch spin, số lượng của các cặp Cooper không bảo toàn mà thay đổi không ngừng. Siêu dẫn là một biểu hiện sự phá vỡ tự phát của tính đối xứng chuẩn; cùng với hiện tượng sắt-từ, đó là hai ví dụ của SBS.

3- Hiện tượng SBS giúp ta hiểu tại sao boson chuẩn photon, trên nguyên tắc phải *không* có khối lượng, cuối cùng lại hóa ra *có* khối lượng trong vật liệu siêu dẫn. Nó quả là một diệu pháp cho hai boson chuẩn của lực yếu *W, Z* dựa vào để có khối lượng. Trong cơ chế BEH, cặp Cooper được thay thế bởi trường Higgs vô hướng để mang khối lượng cho *W, Z* của lực hạt nhân yếu (chú thích 28).

Nhưng hãy còn một vướng mắc quan trọng phải vượt qua. Thực vậy, một hệ quả tất yếu của hiện tượng SBS (được Nambu xác định, Jeffrey Goldstone triển khai thêm rồi cuối cùng Goldstone, Salam, Weinberg chứng minh thành một định lí) là phải tồn tại một hạt không khối lượng, không spin, được gọi là boson Nambu-Goldstone (NG). Ta có thể cảm nhận bằng trực giác định lí Goldstone khi quan sát em nhỏ trên vành nón (Hình 9). Em không phải tốn chút năng lượng nào mà vẫn có thể di chuyển dễ dàng quanh vành nón vì bất kì trạng thái căn bản nào trên vành nón cũng giống

hệt nhau. Không cần chút năng lượng nào để di chuyển thì cũng giống như dựa vào tác động của một hạt nhạt phèo, không khối lượng, không spin, đó chính là boson NG mà thực nghiệm có thể dễ dàng phát hiện. Định lí này đã làm đau đầu bao nhà vật lí khi muốn áp dụng đối xứng chuẩn Yang-Mills và SBS để khám phá định luật của lực yếu vì thực nghiệm chưa bao giờ cho thấy boson NG bao giờ cả (trừ trường hợp gần đúng của pion có khối lượng rất nhỏ so với các hadron), vậy boson NG là một di sản cồng kềnh của SBS cần phải loại bỏ.

P. Higgs và đồng nghiệp đã thành công khi chứng minh nhất quán được sự triệt tiêu boson NG trong trường hợp đối xứng chuẩn định xứ (và chỉ trong trường hợp này) mà trước đó Philip Anderson cũng đã phác hoạ một ý tưởng tương tự nhưng không chứng minh. Một cách tổng quát thì bất kì hạt nào có spin 1 và không khối lượng (như photon chẳng hạn) chỉ có hai phân cực (spin ± 1) trực giao với vectơ xung lượng $\mathbf{k}$ của nó. Nếu hạt spin 1 đó có thêm phân cực thứ ba (spin 0) nằm dọc trên $\mathbf{k}$ thì nó sẽ có khối lượng. Trong cơ chế BEH, chính boson NG spin 0 (coi như phân cực thứ ba) đã mang khối lượng cho boson chuẩn W, Z của lực yếu (chú thích 28).

Vì đối xứng chuẩn bị phá vỡ tự phát do trường vô hướng Higgs tạo nên, trong khi định luật tương tác của lực yếu về tổng thể không bị phá vỡ nên Gerard 't Hooft và Martinus Veltman đã chứng minh[30] thành công là lực yếu cũng tái chuẩn hóa được như điện-từ, hai ông đã đoạt giải Nobel 1999 nhờ công trình này.

Có thể nói nôm na rằng BEH đã đạt hai đích với một mũi tên: boson chuẩn của lực yếu khởi đầu nhẹ tênh đã nuốt ba boson NG để cuối cùng trở thành W^+, W^-, Z^0 nặng nề. Không những mang khối lượng cho W, Z, trường Higgs còn mang khối lượng cho quark và lepton với đặc điểm là những khối lượng này tỉ lệ thuận với cường độ tương tác của chúng với boson Higgs.

---

[30] Chính những boson NG spin 0 đã làm triệt tiêu những phân kì liên tục xảy ra với boson spin 1 W, Z trong các vòng kín lượng tử để thuyết điện-yếu có thể tái chuẩn hóa.

Tạm kết

Việc khám phá ra boson Higgs của CERN với những dấu vết rất khả tín ngày mồng 4 tháng 7 năm 2012 (và được bổ sung thêm nhiều dữ kiện mới ngày càng chính xác từ hai thực nghiệm ATLAS và CMS) là kết quả lao động và đam mê không ngừng của các nhà vật lí từ bao năm qua. Nó mở đầu một chương mới trong vật lí vì đây là lần đầu tiên con người khám phá ra một lực mới lạ, mang khối lượng cho vật chất, có thể coi như lực cơ bản thứ năm của tự nhiên, bên cạnh bốn lực cơ bản quen thuộc. Đây cũng là lần đầu tiên xuất hiện một hạt cơ bản duy nhất có spin 0. Các hạt khác đều có spin khác 0: vật chất tượng trưng bởi quark và lepton có spin 1/2, các boson chuẩn W, Z, γ, g (nối kết và truyền tải thông tin để cho các viên gạch cơ bản của vật chất tương tác với nhau) có spin 1.

Nó gợi ra cách tiếp cận mới về khối lượng của vật chất, khác với quan điểm cố hữu coi khối lượng là cái gì cho trước bởi Tự nhiên mà không ai hiểu được nguồn gốc sâu xa. Theo SM, khối lượng của vật chất được tạo ra bởi sự tương tác của chúng với trường Higgs tràn đầy trong chân không của vũ trụ từ Vụ nổ lớn. Khởi đầu tất cả đều không có khối lượng, do tương tác với trường Higgs mà vật chất mang khối lượng, nặng hay nhẹ tùy theo cường độ tương tác lớn hay nhỏ của chúng, càng tác động mạnh với trường Higgs thì trường vật chất (quark, lepton) càng có khối lượng lớn, quark top tương tác mạnh mẽ nhất, neutrino hay electron yếu hơn. Quan điểm về khối lượng có thể đổi khác từ nay, sự tương tác của vật chất với trường Higgs trong chân không lượng tử, một vũ đài náo nhiệt, mới chính là cội nguồn của khối lượng, mà năng-khối lượng lại chính là tác nhân của lực vạn vật hấp dẫn.

Thay cho lời tạm kết với SM, xin trích vài câu mà Einstein trình bày trong bài giảng về thuyết Tương đối rộng ở Đại học Glasgow năm 1933: "Kết quả cuối cùng rất đơn giản, bất kì một sinh viên thông minh nào cũng có thể hiểu được một cách dễ dàng. Nhưng chỉ có thể hiểu được sau khi đã trải qua những năm tháng âm thầm tìm kiếm một sự thật mà người ta chỉ cảm thấy chứ không thể diễn tả chính xác. Người ta chỉ có thể hiểu được điều đó khi lòng ham muốn lên đến mức cuồng nhiệt, và khi đã trải qua những giai đoạn tin tưởng rồi nghi ngờ, nghi ngờ rồi tin tưởng cho tới một lúc nào đó bừng hiểu rõ được sự thật sáng sủa".

NHÓM TÁI CHUẨN HOÁ: MỘT CUỘC CÁCH MẠNG VỀ NHẬN THỨC

Đàm Thanh Sơn

Đôi khi trong các tác phẩm khoa học thường thức, những tiến bộ của vật lí trong thế kỉ 20 được mô tả như một cuộc khám phá các cấu trúc vật chất ngày càng nhỏ. Từ cấu trúc nguyên tử, loài người tìm ra cấu trúc hạt nhân, rồi khám phá tiếp cấu trúc các hạt cơ bản. Theo đó, việc khám phá ra hạt Higgs ở CERN chính là bước cuối cùng trong cuộc chinh phục của loài người vào thế giới vi mô.

Tuy nhiên, có một khía cạnh quan trọng hơn của vật lí thế kỉ 20 là sự khám phá ra các định luật mang tính chất phổ quát của tự nhiên. Các định luật này đôi khi có thể áp dụng được vào những hệ vật lí hết sức khác nhau, ví dụ như các quark và các nguyên tử trong chất lỏng. Điển hình của những khám phá loại này là sự khám phá ra và ứng dụng "nhóm tái chuẩn hoá".

Câu chuyện về nhóm tái chuẩn hoá có hai phần. Phần đầu liên quan đến lí thuyết "điện động học lượng tử", lí thuyết đã mang lại cho Feynman, Schwinger và Tomonaga giải Nobel Vật lí. Lí thuyết này mô tả tương tác giữa các điện tử. Khoảng giữa những năm 1950, người ta tìm ra rằng hằng số tương tác giữa các điện tử ("hằng số cấu trúc tinh tế"), không phải là hằng số. Hằng số này là khoảng 1/137 khi hai điện tử ở xa nhau, nhưng tăng dần lên khi hai điện tử ở gần nhau, càng gần thì hằng số tương tác càng cao. Nếu cho khoảng cách giữa các điện tử giảm dần thì đến một lúc

hằng số tương tác sẽ trở thành vô cùng. Điều này được nhà vật lí Xô viết Lev Landau tìm ra khoảng năm 1955. Phương trình mô tả biến thiên của hằng số tương tác theo khoảng cách được gọi là "phương trình nhóm tái chuẩn hoá".

Nguồn gốc thứ hai của nhóm tái chuẩn hoá là một vấn đề hoàn toàn khác: vấn đề chuyển pha bậc hai. Cần giải thích một chút về chuyển pha bậc hai.

Một quá trình chuyển pha sẽ xảy ra khi ta đun sôi một nồi nước: nước chuyển từ trạng thái lỏng sang trạng thái khí. Chất lỏng và chất khí khác nhau như thế nào thì có lẽ ai cũng cảm thấy được: nước và hơi nước có mật độ rất khác nhau, nước đặc hơn hơi nước rất nhiều. Những chuyển pha như vậy gọi là chuyển pha bậc một.

Thế nhưng đến thế kỉ 19, người ta phát hiện ra rằng ranh giới giữa chất khí và chất lỏng có thể không rạch ròi như thế. Khi tăng áp suất lên, ban đầu vẫn có chuyển pha giữa chất lỏng và chất khí, nhưng chênh lệch mật độ giữa chất lỏng và chất khí dần ít đi. Đến một áp suất nhất định thì hoàn toàn không còn sự khác nhau giữa chất lỏng và chất khí (đối với nước áp suất này bằng 218 lần áp suất khí quyển). Tại áp suất này, chuyển pha bậc một biến thành chuyển pha bậc hai (ngược lại, sự khác nhau giữa thể rắn và thể lỏng, thể khí luôn tồn tại).

Chuyển pha bậc hai không chỉ xảy ra giữa chất lỏng và chất khí. Năm 1895 Pierre Curie tìm ra là nhiều chất sắt từ cũng đi qua chuyển pha bậc hai khi nhiệt độ thay đổi. Những chất này có tính nam châm ở nhiệt độ thấp và không còn tính nam châm ở nhiệt độ cao. Nhiệt độ mà ở đó tính nam châm mất đi là nhiệt độ của một chuyển pha bậc hai.

Lí thuyết chuyển pha Landau

Trong những năm 1930, Lev Landau là người đầu tiên xây dựng lí thuyết về chuyển pha. Theo Landau, mỗi chuyển pha đều gắn với một khái niệm gọi là "tham số trật tự". Với trường hợp chuyển pha trong chất sắt từ thì tham số trật tự là độ nhiễm từ, còn với trường hợp của nước, tham

số trật tự là mật độ. Lí thuyết chuyển pha Landau là một lí thuyết trực giác, đơn giản đưa ra để giải quyết một vấn đề vật lí thực nghiệm nóng hổi, nhưng mang tính phổ quát cao.

Lí thuyết Landau giải thích tại sao phải có các chuyển pha. Tuy nhiên một số chi tiết của lí thuyết này không phù hợp với thực nghiệm. Những chi tiết này liên quan đến sự biến thiên của tham số trật tự xung quanh chuyển pha bậc hai. Tham số này được gọi là beta, Landau tiên đoán giá trị của beta phải bằng 1/2. Tuy nhiên thực nghiệm ngay từ đầu thế kỉ trước cho thấy beta gần bằng 1/3 thì đúng hơn. Khác với giá trị 1/2 của Landau, không có một lí thuyết đơn giản nào cho giá trị beta bằng 1/3. Điều này khiến cho nhiều người thấy khó có thể chấp nhận những kết quả thực nghiệm - có lẽ đã có một sự sai sót nào đó chăng?

Năm 1944 nhà vật lí người Mĩ Onsager đã đưa ra lời giải chính xác cho mô hình đơn giản nhất của chất sắt từ - mô hình Ising hai chiều. Onsager chỉ ra là beta trong mô hình hai chiều này bằng 1/8 - một con số khác rất nhiều so với con số 1/2 của Landau. Như vậy đã có một bằng chứng không thể phủ nhận được là lí thuyết Landau về chuyển pha cần được thay đổi. Tuy nhiên, mọi cố gắng giải chính xác mô hình Ising ba chiều vẫn chưa thành công.

Cuộc cách mạng của Kenneth Wilson

Khoảng những năm 1960, một chuỗi khám phá trong vật lí thống kê đã dẫn đến lời giải cho bài toán về chuyển pha bậc hai. Điểm mấu chốt trong lời giải này là ta phải thay đổi cách nhìn vấn đề. Leo Kadanoff là người đầu tiên nhận thức được điều này. Ông cho rằng để giải quyết vấn đề chuyển pha trong chất sắt từ, phải tưởng tượng là ta gộp hai nguyên tử lại và thay nó bằng một nguyên tử đại diện. Tương tác giữa các nguyên tử đại diện này sẽ hơi khác so với tương tác giữa các nguyên tử ban đầu. Bước tiếp theo, ta lại thay hai nguyên tử đại diện bằng một đại diện cao hơn. Tương tác giữa các nguyên tử ở mức này cũng sẽ thay đổi. Nói nôm na, có thể tưởng tượng là ta tổ chức một tập hợp người ở cấp xã, cấp huyện, cấp tỉnh,

cấp quốc gia, v.v., và có những luật riêng cho việc tương tác giữa các xã, giữa các huyện, giữa các tỉnh, v.v.

Cách giải quyết của Kadanoff có liên quan gì đến lí thuyết chuyển pha bậc hai? Đó là vì tại điểm chuyển pha, luật tương tác giữa các nguyên tử đại diện không thay đổi khi ta đi từ mức thấp lên mức cao hơn. Vẫn theo ví dụ nôm na của ta ở trên, luật cho tương tác giữa các xã giống hệt như luật cho tương tác giữa các huyện, giữa các tỉnh. Điều này chỉ xảy ra khi hệ vật lí nằm đúng ở điểm chuyển pha bậc hai.

Kenneth Wilson mô tả sự biến thiên của các đại lượng vật lí từ cấp dưới lên cấp trên trong phương trình tái chuẩn hoá của lí thuyết trường, và các chuyển pha bậc hai là những nghiệm đặc biệt của phương trình này (gọi là "điểm cố định"). Wilson cùng nhiều người khác đã ứng dụng thành công lí thuyết trường vào việc mô tả các chuyển pha bậc hai. Sau công trình của Wilson, có thể nói ta đã hiểu được bản chất của các chuyển pha.

Lí thuyết nhóm tái chuẩn hoá mới đã dẫn đến một cuộc cách mạng trong nhận thức về vai trò của lí thuyết trường trong vật lí hiện đại. Lí thuyết trường, từ một lí thuyết mô tả các hạt cơ bản, trở thành lí thuyết vạn năng có khả năng mô tả các hiện tượng trong nhiều hệ vật lí khác nhau, kể cả những hệ không liên quan đến vật lí hạt cơ bản mà thuộc về vật lí chất rắn, chất lỏng.

Nhóm tái chuẩn hoá đã chấm dứt xu hướng chia tách giữa các ngành vật lí. Trước đó, các nhà vật lí lí thuyết hạt cơ bản không thể nói chuyện chuyên môn với các đồng nghiệp trong lí thuyết chất rắn. Điều này gây ra không ít mâu thuẫn trong ngành vật lí. Sau khi nhóm tái chuẩn hoá được ứng dụng vào lí thuyết chuyển pha, vật lí lí thuyết lại trở thành một thể thống nhất: các công cụ của một ngành vật lí có thể được ứng dụng vào một ngành khác.

Lời kết

Lí thuyết Landau-Wilson đóng vai trò trung tâm trong bức tranh về các chuyển pha. Tuy nhiên từ cuối thế kỉ 20-đầu thế kỉ 21, ngày càng có nhiều

chuyển pha không thể mô tả được bằng lí thuyết này. Đây là những chuyển pha không có "tham số trật tự" mà Landau đã đưa ra.

Một trong những chuyển pha hiện đang được tập trung nghiên cứu cao độ là các chuyển pha topo. Đây là chuyển pha giữa các trạng thái có tính chất topo khác nhau. Nói một cách nôm na, đó là chuyển pha từ cái cốc không quai sang cái cốc có quai. Liệu những nghiên cứu này đã dẫn đưa đến một sự thay đổi về nhận thức trong vật lí chất rắn? Một lần nữa lí thuyết trường - "lí thuyết trường topo" - có thể trở thành cụm từ cần dùng để mô tả những trạng thái mới của vật chất, thường được gọi là các trạng thái topo.

Liệu những nghiên cứu này có dẫn đến những đột phá về kĩ thuật hay không? Nhiều người hi vọng là những trạng thái topo sẽ giúp chúng ta chế tạo ra máy tính lượng tử. Nhưng đây lại là một chủ đề khác.

HẠT HIGGS và CHÚNG TA

Nguyễn Xuân Xanh[1]

Không có gì tồn tại ngoài các nguyên tử, atomos, và không gian rỗng; tất cả những thứ khác như màu sắc, vị ngọt, đắng của sự vật đều có tính biểu kiến.

Democritus

Chúng ta không là gì cả. Nhưng những gì chúng ta đi tìm, là tất cả.

Hölderlin

Tóm tắt - Mô hình Chuẩn, lí thuyết chuẩn của vật lí hạt thế kỉ 20, có thể ví như một đô thị lượng tử dưới lòng đất cấp hạ nguyên tử siêu nhỏ với nhiều loại "cư dân", nhiều quy luật nghiêm ngặt chi phối từng loại cư dân. Có loại cư dân "lao động" (quark, lepton) tồn tại để cho nguyên tử, phân tử, vật chất, con người và vũ trụ tồn tại, giống như những "chú ong thợ" li ti suốt đời chỉ biết cặm cụi lao động cho sự tồn tại của kẻ khác; và loại cư dân "quản lí" (các boson truyền lực) có chức năng làm "cảnh sát" và/hay "đưa tin". Tất cả được xây dựng trên nền móng là trường của hạt Higgs, là hạt mà cộng đồng vật lí hạt đi tìm ngót nửa thế kỉ qua, mà nếu không có cơ chế đặc biệt này, vũ trụ và chúng ta sẽ thành hư vô. Các cư dân này là "đại biểu" của các cư dân cùng loại cư ngụ trong toàn vũ trụ, giống hệt nhau về

---

[1] Tác giả cảm ơn GS. Phạm Xuân Yêm, Paris, một trong những chuyên gia Việt hàng đầu về vật lí hạt, người đã kiên trì giải thích nhiều câu hỏi chuyên môn, cũng như đọc lại bản thảo; nếu vẫn còn sai sót, thì đó là phần của tác giả. Bạn đọc cần đọc thêm bài của GS. Yêm về Mô hình Chuẩn trong kỉ yếu để hiểu Mô hình Chuẩn rõ hơn, nhiều hơn, nhất là những ai có mối quan tâm chuyên sâu.

mọi phương diện như những giọt nước. Đô thị và các cư dân có những tính chất lượng tử và tương đối tính rất đặc thù. Hạt không còn là hạt, mà có một dasein thứ hai: sóng. Sóng-hạt là khái niệm "nhị nguyên" có tính cách mạng của thuyết lượng tử, và cần đến thuyết trường để mô tả chính xác. Thuyết lượng tử là một "khoa học bí mật", "thần bí", nhưng không phải tất cả những gì thần bí đều là thuyết lượng tử chính xác. Thế giới đó luôn luôn sôi động, sinh, diệt, hợp, tan, là lẽ thường, để giữ vững sự bình yên và ổn định của chúng ta. Con người để là con người, cần đến biết bao nhiêu hành động kì diệu của tạo hóa. Và khi thân xác con người "trở về cát bụi", thì nó trở về đâu? Về thế giới lượng tử kia.

Phá vỡ đối xứng trong chân không bởi cơ chế Higgs, một khái niệm trung tâm của vật lí hạt cơ bản, mở đường cho sự phát triển vật chất và tiến hóa mà vạn vật và con người cuối cùng là sản phẩm. Ngạc nhiên thay, phá vỡ đối xứng cũng được tìm thấy ở dưới đất: *hacho*, phá vỡ đối xứng và hài hòa trong nền nghệ thuật của Nhật Bản, hàm chứa động lực phát triển, khác với Trung Hoa là vương quốc luôn luôn đi tìm đối xứng. Bất đối xứng này ẩn dưới bề mặt của sự đối xứng hài hòa của xã hội phương Đông, hiện tượng vật lí hạt gọi là đối xứng ẩn. Xã hội phong kiến từng nhân danh hài hòa giữa trời, đất, vua, tôi để tự bảo tồn trật tự hàng nghìn năm, ngăn cản sự phát triển, cho đến khi trật tự ấy bị phá vỡ trong sự va chạm với văn minh phương Tây. Nhật Bản, vốn chứa đựng tính phá vỡ hài hòa từ bên trong, có lẽ đã dễ dàng chấp nhận sự phá vỡ đối xứng ấy gây ra từ bên ngoài, và nhanh chóng phát triển, trong khi Trung Hoa chấp nhận nó khó khăn, dẫn đến sụp đổ và đau khổ.

Vật lí hạt cơ bản là cuộc phiêu lưu thế kỉ, một "đại tự sự", kéo dài từ đầu thế kỉ 20, qua những chặng đường đầy kịch tính, để rồi hoàn tất vào hai thập niên cuối cùng của thế kỉ, tiến hóa từ con vịt xấu xí thành thiên nga lộng lẫy. Vật lí hạt không phải để đi tìm hạt như công việc "tìm bướm" của nhà động vật học, mà chỉ sử dụng hạt để đi tìm các nguyên lí tối hậu dưới đáy của vũ trụ (Weinberg). Hiểu vật lí hạt cơ bản là để hiểu cái to lớn của trí tuệ con người, những sinh vật nhỏ bé đến độ vô nghĩa trong biển vũ trụ mênh mông, và hiểu những quy luật chi phối vô cùng tinh tế.

Nếu mặt trời chiếu sáng thái dương hệ mênh mông thì trí tuệ con người đang chiếu sáng lâu đài đẹp đẽ của tạo hóa ở nơi sâu thẳm nhất của vũ trụ. *"Chân ngã chiếu sáng trong vũ trụ bằng trí tuệ"* (The self shines in space through knowing) như kinh Upanishads viết. Đi tìm chân lí luôn luôn là niềm mơ ước của con người từ lúc bị đuổi khỏi địa đàng vì ăn phải trái táo cấm tri thức của Thượng Đế, bị giam mình trong thế giới *bất đối xứng* ở dưới kia, với mơ ước trở về đối xứng trên kia, và một ngày nào đó sẽ nhận diện được bản đồ của tạo hóa, như giấc mơ của Einstein, được *"nhìn mặt đối mặt"* với Thượng Đế.

Mô hình Chuẩn chưa phải là "thuyết của tất cả", hay "thuyết của gần như tất cả", nhưng quả thật con người đã tiến một bước ngàn dặm trong sự hiểu biết thế giới vi mô và vũ trụ, mở ra nhiều hi vọng và kì vọng cho những giai đoạn sắp tới. Cùng với vũ trụ học và Mô hình Chuẩn, con người đã có một bản đồ vũ trụ hoành tráng hơn tất cả mọi thời đại. Tiếp đến thế kỉ 21, vật lí nào đây sẽ đến, cách mạng khoa học nào đây sẽ đến? Những Newton, Einstein, Planck nào sẽ xuất hiện? Những bứt phá của thế kỉ 20 là sự dọn đường cho những bứt phá kì vĩ thế kỉ 21?

Những khám phá khoa học "gây sốc" của thế kỉ qua là những nhân tố vô giá của nền văn hóa thế kỉ 20 chứa đựng đầy những kì quan chưa từng thấy. Nếu bị cắt khỏi phần khoa học này, chúng ta sẽ giống như công dân của thành phố Florence, mà không được chiêm ngưỡng các tác phẩm tranh trần, tranh tượng của những nghệ sĩ vĩ đại thời Phục hưng như Timothi Ferris từng nói, hay sẽ rơi vào một "bi kịch" bởi thiếu đi phần văn hóa chứa đựng nền tảng của khoa học này như Steven Weinberg viết. Người Việt Nam hãy nhanh chân, nếu không muốn tiếp tục bị bỏ lại xa hơn nữa trên đại lộ của tri thức ngày càng tăng tốc. Tò mò của tri thức không phải trò chơi vô nghĩa. Lịch sử đã cho thấy, động cơ tò mò mạnh mẽ thường được vinh danh với sự kính trọng, và đền đáp lại bằng sự phồn vinh và tiến bộ xã hội. Dân tộc Phù Tang là một ví dụ cổ điển gần gũi không thể quên.

Tác giả muốn chia sẻ với độc giả những gì một con kiến vô minh, vì sự tò mò, bò vào núi chữ của vật lí hạt để tìm ra các dấu vết con đường mòn

mà những người khổng lồ đã đi qua, mong muốn truyền đạt lại những ấn tượng của cuộc hành trình vĩ đại đã cuốn hút bao nhiêu người ngay từ những nốt nhạc đầu. Bài này, nói về những ý tưởng, lịch sử và nhân văn, vẫn còn nhiều điều thiếu sót và chưa nói hết. Nếu độc giả ở nơi này nơi kia cảm thấy rối rắm, hay khó chịu, là do "lực bất tòng tâm". Vật lí lượng tử, tự nó, là "ngược với lẽ thường" và đầy "rối rắm". Xin được đón nhận trong sự cảm thông và lượng thứ.

PHẦN I

Có nhiều thứ trên Trời và dưới Đất, Horatio,
Hơn là được mơ tưởng trong triết lí chúng ta.
Shakespeare, *HAMLET*

GIẢI NOBEL 2013

Ngày 4 tháng 7 năm 2012 toàn thế giới đã nhận được một tin "hỏa tốc" ở cấp độ cao nhất của sự kích thích, không phải như tin cuộc tấn công vào tòa tháp Trung tâm Thương mại Mĩ, hay tin về cuộc ám sát Tổng thống John F. Kennedy, hoặc tương tự, mà là về việc CERN đã tìm ra "hạt của Chúa" bởi cỗ máy gia tốc vĩ đại LHC với khối lượng khoảng 125 GeV (Giga electron Volts) như dự đoán bởi lí thuyết! Cuối cùng cỗ máy mạnh mẽ đã "rung" được trường Higgs im lìm lan tỏa trong vũ trụ để đánh bật ra được hạt Higgs của nó. Nó xuất hiện cực kì ngắn ngủi trong các cuộc va chạm, nhưng sự phân rã hạt nhân của nó đã để lại những dấu vết mà các máy dò có thể phát hiện được, cũng như phân tích đống gạch vụn có thể giúp tìm ra khối lượng của nó.[2] Đó là phương pháp nhìn của các nhà thực nghiệm ở thế giới siêu nhỏ. Hai tổ máy dò tinh xảo CMS và ATLAS của hai đội lần lượt được hơn ba ngàn nhà khoa học thao tác, và các thành viên ngồi trước

[2] *Science News*, 27.

màn hình máy tính khắp nơi trên thế giới theo dõi và phân tích các núi dữ liệu. Đó quả là kì công của *Big Science*, khoa học lớn. Đó không phải là thành công của chỉ CERN, hay của các nhà vật lí, mà thành công của cả trí tuệ nhân loại.

"Chúng ta giờ đây đã tìm ra viên đá nền tảng còn thiếu của Mô hình Chuẩn", Giám đốc CERN Rolf-Dieter Heuer tuyên bố. "Đó là một ngày trọng đại cho các nhà vật lí hạt, và một khám phá sâu sắc rằng tự nhiên hoạt động thế nào" như Pier Oddone[3], Giám đốc của Fermilab phát biểu. "Chúng ta đã đi sâu vào cấu trúc của vũ trụ ở mức độ chưa bao giờ đạt đến trước đây", nhà vật lí Joe Incandela[4] (Giáo sư của Đại học UC Santa Barbara), phát ngôn viên của một trong hai đội khám phá hạt Higgs (CMS) nói. Peter Higgs, 83 tuổi, ngồi trong xêmina tuyên bố cảm động rõ ràng: "Thật là một điều không thể tin được là sự khám phá này lại xảy ra trong đời tôi."[5] Thế giới đã để ra không biết bút mực nào để viết về hạt Higgs, và người ta tự hỏi: Ai sẽ là người lĩnh giải Nobel cho ý tưởng cơ chế Higgs? Giờ đây, sau hơn một năm, Ủy ban giải Nobel cuối cùng đã trao giải Nobel danh giá cho François Englert (Bỉ) và Peter Higgs (Anh), hai trong sáu nhà vật lí có những đóng góp đầu tiên cho cơ chế Higgs, có thể gọi là cơ chế BEH, tên viết tắt của ba người công bố đầu tiên Brout (đã mất), Englert và Higgs; hay cơ chế BEHHGK, hay còn tên dài hơn nữa nếu tính thêm người cha "đỡ đầu" ý tưởng Philip Anderson, hay Yoichiro Nambu, và "bà mụ trẻ" Gerard 't Hooft, người đã có công làm cho thuyết trường lượng tử của lực thống nhất điện-yếu được "sạch sẽ" những khó khăn về toán học để có thể "thưởng thức" được. Ba tên tuổi nữa chưa được tính trong giải này, đó là Gerald Guralnik, Carl Hagen (hai người Mĩ) và Tom Kibble (Anh). Đó là chưa tính đến hàng ngàn khoa học gia của 80 quốc gia chung sức đi tìm "hạt của Chúa" tại CERN. Giải Nobel làm nhiều người hài lòng, nhưng không phải tất cả.

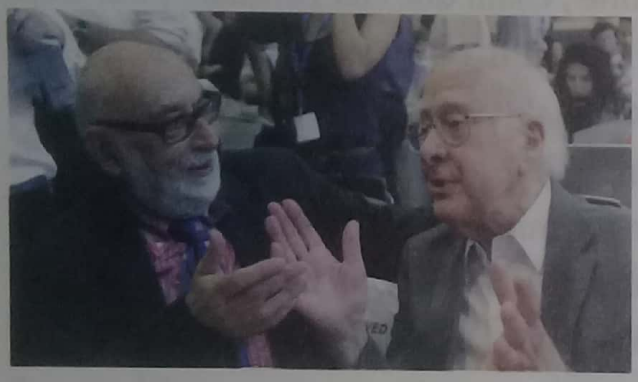
---

[3] *Science News*, 6.

[4] *Science News*, 28.

[5] *Science News*, 5.

Hạt Higgs đã tiến hóa từ một *giả thuyết* để trở thành *niềm tin* trong cộng đồng vật lí hạt cơ bản. Với giải Nobel 1979 cho ba tác giả của thuyết thống nhất hai lực điện-từ và lực yếu, rồi giải Nobel 1984 cho hai tác giả đã khám phá ra các boson truyền lực yếu W, Z, thì niềm tin vào sự tồn tại của hạt Higgs đã "chắc như đinh đóng cột", bởi thuyết thống nhất điện-yếu dựa trên cơ chế Higgs. Nếu thuyết điện-yếu đúng thì có gì hạt Higgs lại sai? Không có lửa thì sao lại có khói?



François Englert (trái) đang trò chuyện với Peter Higgs tại một hội nghị do CERN tổ chức tại Gevena ngày 12 tháng 7 năm 2012, sau khi hạt Higgs được tuyên bố tìm thấy (Ảnh: REUTERS).

Cảnh quan máy gia tốc khổng lồ LHC của CERN ở thành phố Geneva, núi Mont Blanc, đường chu vi và đường hầm của LHC nơi đã tìm ra hạt Higgs. Ở đây các hạt được nâng lên tới năng lượng cả chục TeV (Tera electron Volts), hay chục ngàn tỉ eV trước khi va chạm (Courtesy of CERN).

Hạt Higgs "lớn" bao nhiêu và tại sao lại quan trọng đến như vậy? Xin thưa: nó được xem như không có kích thước, chỉ là một điểm chấm, không

chứa hạt nào bên trong cả, theo hiểu biết đến nay, được xem là một trong 17 hạt cơ bản, nhỏ hơn 10^{-18} m nếu nói về kích thước, tức là 0. 000 000 000 000 000 001 m. Thế nhưng tại sao nó lại quan trọng như thế? Bản thân các hạt Higgs thật ra không quan trọng, nhưng chúng lại là *bằng chứng* và *biểu tượng* của trường Higgs tồn tại đầy trong vũ trụ, giống như hạt photon và trường điện từ. Hạt Higgs tự nó không tạo ra khối lượng, mà chính trường Higgs mới tạo ra khối lượng cho các hạt vật chất khác, thông qua cái được gọi là cơ chế Higgs, như đã nói ở trên. Trường Higgs không được cấu tạo bằng các hạt, mà chứa một loại "tích" (charge, như điện tích) có mặt khắp chân không. Các hạt tương tác với lực yếu (các lepton như electron, quark, các boson truyền lực yếu, bản thân hạt Higgs) sẽ tương tác với "tích Higgs", từ đó có khối lượng. Càng tương tác nhiều, khối lượng càng lớn. "Lực Higgs" không tương tác bằng cách trao đổi các boson Higgs, như các lực điện-từ, lực yếu và lực mạnh. Nếu người ta kích thích vào trường Higgs bằng cách thêm một lượng thì năng lượng có thể tạo ra được hạt Higgs.

Vậy nên boson Higgs được xem là biểu hiện của trường Higgs, được đồng hóa với sự tồn tại của trường và cơ chế Higgs. Sự khám phá hạt Higgs do đó có ý nghĩa cho sự xác nhận cuối cùng của Mô hình Chuẩn, rằng nó là nhất quán. "Thấy mới tin", mặc dù cơ chế Higgs được áp dụng với những kết quả chính xác "như đúc" từ mấy thập kỉ qua. Sự quan trọng của cơ chế Higgs được dồn vào hạt biểu tượng Higgs. Cho nên người ta nói, không có hạt Higgs, không có chúng ta, không có tình yêu, tinh tú, thiên hà. Hạt Higgs đã từng bị một nhà xuất bản đổi tên từ "hạt trời đánh", đáng "nguyền rủa", thành "hạt của Chúa" bởi tác giả giải Nobel Leon Lederman, vì tìm nó mấy thập kỉ với bao gian nan tốn kém mà vẫn chưa thấy, để rồi bị dư luận phê phán vì chữ "Chúa". Nhưng điều đó cũng không có gì ghê gớm nếu chúng ta biết rằng Einstein là người sử dụng từ Chúa nhiều nhất, mặc dù ông không tin vào Chúa của đời thường. Đó chỉ là cách nói truyền thống của phương Tây từ thời xa xưa đến thời Phục hưng.[6] Việc đi tìm hạt

[6] Ngày nay đến 95% các nhà khoa học là "vô thần". Newton trước khi mất từ chối nhận *sacrament* ("bí tích xức dầu kẻ liệt"); đương thời ông thỉnh thoảng lại bị xem là "dị giáo".

Higgs là cực kì khó, khó như đi tìm một cây kim trong cả triệu đống rơm, và lại vô cùng tốn kém. Từ hàng tỉ sự va chạm hạt diễn ra hằng giây đồng hồ trong lò phản gia tốc, hiếm khi có một hạt Higgs xuất hiện. Nhưng với cỗ máy LHC 10 tỉ Đô la Mĩ, hạt Higgs quả đã khó "có cửa trốn thoát".

Cả quá trình xây dựng Mô hình Chuẩn là các trò chơi "trốn tìm" ngoạn mục đầy kịch tính giữa nhà khoa học và mẹ Tự nhiên, khi thì nhà khoa học bị thách đố trước những sự kiện từ trên trời rơi xuống hay từ các máy gia tốc tạo ra, làm rối bời, vỡ mộng, khi thì nhà khoa học "bắt mạch" đúng những hạt mới mà Tự nhiên muốn giấu, nhưng phải đợi năm, mười năm mới tìm được sự xác nhận thực nghiệm. Riêng hạt Higgs phải cần ngót nửa thế kỉ mới tìm thấy chứng cứ. Trong nửa đầu của thế kỉ 20, các nhà "hái lượm" của vật lí hạt chiếm sân khấu, họ là những nhà thực nghiệm, những thu hoạch của họ đã đặt khoa học trước những vấn đề có tính quy luật, lí thuyết rất "nghiêm trọng". Nửa sau thế kỉ, các nhà lí thuyết chiếm lại sân khấu. Các thuyết tương đối và lượng tử trong ba thập kỉ đầu của thế kỉ 20 đã khai mào cho một cuộc cách mạng vĩ đại chưa từng có trong lịch sử vật lí thế giới. Những năm của nửa sau thế kỉ 20, các nhà lí thuyết sử dụng những công cụ đó một cách tinh tế hơn để tìm "bản đồ" bí mật của mẹ Tự nhiên. Và họ đã rất thành công, Mô hình Chuẩn là một "kì tích" của trí tuệ, thế kỉ 20 là *Thế kỉ thần kì*, bắt nguồn từ *Năm thần kì* 1905 của thanh niên 26 tuổi Albert Einstein thuộc Sở Sáng chế Thụy Sĩ đã bộc lộ tài năng toàn diện cùng một lúc, thay đổi cách tư duy của thế giới về không gian, thời gian, bản chất của ánh sáng và vật chất, đúc lại các nền tảng của vật lí hiện đại.

Tìm thấy hạt Higgs đã đẩy niềm hi vọng lên cao, rằng nhân loại đang có một bước tiến vĩ đại trong tương lai. Một cửa sổ được mở ra thế giới còn chưa thấy. Có thể boson Higgs là thành viên của một gia đình rộng lớn hơn nhiều, với các bà con họ hàng có thể giúp hiểu vũ trụ nhiều hơn, như vật chất tối trong vũ trụ và lực hấp dẫn. "Chúng ta đang ở ngay biên giới của một cuộc thám hiểm mới" Incandela nói. "Có thể chúng ta không thấy gì ngoại hạng hơn... hoặc chúng ta mở ra cả một vương quốc mới của khám phá."[7]

---

[7] *Science News*, 29.

NGUỒN GỐC CỦA KHỐI LƯỢNG

Nhà vật lí David Miller của nhóm vật lí thuộc University College London nhằm tranh thủ sự tài trợ của chính phủ Anh cho CERN đã đưa ra hình tượng này để mô tả cơ chế Higgs tạo khối lượng: hãy tưởng tượng bà Margaret Thatcher, do sự nổi tiếng của bà, khi bước vào một phòng tiếp tân đầy chính khách, bà bị vây quanh, tốc độ đi của bà chậm lại, dù bà muốn đi tiếp, sức ì là "khối lượng".[8] Sức ì, hay quán tính, là đặc trưng của khối lượng. Những ví dụ minh họa đại loại như thế có nhiều. Tuy nhiên, những hình ảnh này chỉ có tính chất minh họa cho dễ hiểu chứ quá trình tạo khối lượng trong vật lí khác hơn.

Mô tả cơ chế Higg tạo ra khối lượng của David Miller.

Khi Margaret Thatcher bước vào phòng bà liền bị vây quanh, bị tạo sức ì, tức khối lượng (Courtesy of CERN).

[8] Xem thêm chi tiết trong *Baggott*, 2012, 173-176.

Nhưng có phải khối lượng được tạo ra bằng cơ chế Higgs là *tất cả* khối lượng của vật chất thấy được trong trời đất hay không? Thực tế là không. Khối lượng do hạt Higgs tạo ra chỉ bằng 1% tổng khối lượng thấy được của thế giới. Nhưng nó vẫn quan trọng, vì không có nó thì *ngay lập tức* tất cả các viên gạch cơ bản quark của nguyên tử sẽ nhẹ như hạt photon của ánh sáng, bay tứ tán với tốc độ của ánh sáng, và không có nguyên tử nào được kết thành, đồng nghĩa là không có vật chất và chúng ta. Khi có khối lượng từ cơ chế Higgs, sẽ có khối lượng lớn hơn tiếp theo sau: khối lượng từ các gluon của lực mạnh nguyên tử không ngừng canh giữ và quản lí các quark trong các hạt proton và neutron của nhân nguyên tử. Lực mạnh này cũng là lực làm nên bom nguyên tử. Công thức "năng lượng bằng khối lượng" của Einstein đã giải quyết vấn đề này. Năm 1905 ông đã đưa ra một định luật quan trọng, như hệ quả của thuyết tương đối hẹp: khối lượng và năng lượng là một nhưng ở hai dạng khác nhau, thể hiện qua công thức $m = E/c^2$ hay $E = mc^2$, trong đó m là khối lượng, E là năng lượng và c là vận tốc ánh sáng.[9] Năng lượng chính là khối lượng. Điều này thể hiện rõ trong các máy gia tốc, ở đó tổng khối lượng của các hạt sau va chạm thường lớn hơn tổng khối lượng của các hạt ban đầu. Nó cũng được thể hiện ở trường hợp tia sáng tuy không có khối lượng nhưng vẫn bị mặt trời hút làm cong khi đi ngang qua. Theo lực hấp dẫn Newton, lực hút diễn ra giữa các đối tượng vật chất có khối lượng. Nhưng ở đây tia sáng vẫn bị hút, vì nó có năng lượng, và năng lượng là một dạng khác của khối lượng.[10] Cho nên, một điều rất ngạc nhiên: phần lớn năng lượng trong người của bạn hay của đồ vật là để giữ bạn được là bạn, đồ vật là đồ vật! Vật chất mà trường Higgs tạo ra có lẽ là "của quý" nên cần một số

---

[9] Tất cả các khối lượng nói ở đây đều là khối lượng tĩnh của các hạt. Tương tự, khối lượng của hạt nhân nguyên tử không bằng, mà *nhỏ hơn* tổng khối lượng của các hạt proton và neutron làm nên nó. Sự chênh lệch này tương ứng với một năng lượng, theo công thức tương đương của Einstein. Đó cũng chính là năng lượng của lực mạnh để kết nhân nguyên tử lại, gọi là *năng lượng kết*. Chính năng lượng này, sẽ được giải phóng thành *năng lượng nguyên tử* khi có sự phân hạch (fission), làm thành sức mạnh của điện hay bom nguyên tử. Trong trường hợp của tổng hợp (fusion) tương tự. Xem *Goldman Lexikon*, 347.

[10] *Einstein & Infeld*, 242.

năng lượng lớn nhiều lần để gìn giữ nó! Việt Nam có câu "của một đồng, công một lượng", nếu hiểu công ở đây là để giữ của quý đó, thì nó đúng trong trường hợp này.[11]

Các hạt proton (điện tích +1) và neutron (trung hòa), làm thành nhân nguyên tử, nhân này được bao bọc bởi một "vỏ" gồm các electron (điện tích -1, đơn giản đơn vị *e*) xung quanh, có bao nhiêu proton trong nhân thì có bấy nhiêu electron để cân bằng điện tích, để nguyên tử trở thành trung hòa (nhưng thực tế cũng có ít điện tích lọt ra ngoài để kết nối các nguyên tử làm thành phân tử trong hóa học). Proton là tên được Rutherford, người tìm ra nó đặt, lấy từ tiếng Hi Lạp *prōton*, dạng trung hòa của *prōtos*, đầu tiên.

Hạt Higgs, nếu biết nói, có thể nói với các anh em quark và lepton của mình rằng: *"Thân thể của anh em đâu phải là của riêng mình nữa, vì anh em đã được đưa đến đây với một cái giá. Cho nên hãy tôn vinh (Hạt) Thiên Chúa nơi thân xác anh em"* như Kinh Côrintô do tông đồ Phaolô gửi tín hữu ở Côrintô viết.[12]

Câu hỏi về nguồn gốc của vật chất thật vô cùng khó khăn, tưởng chừng như không có lời giải đáp. Ngay Charles Darwin còn nhận xét: *"Suy nghĩ về nguồn gốc của sự sống cũng là điều vô nghĩa cũng như suy nghĩ về nguồn gốc của vật chất."*[13] Nhưng thực tế hơn một thế kỉ sau Darwin, con người đã hiểu được cơ chế tinh vi nguồn gốc của nó và sự cấu thành của vật chất.

---

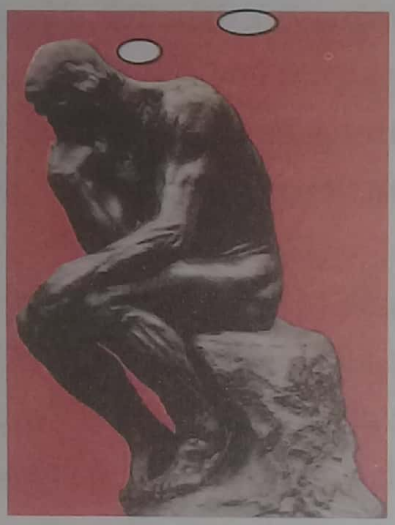
[11] Tham khảo thêm chi tiết trong Frank Wilczek, *The Lightness of Being*, Chương 10, "The Origin of Mass". Wilczek có lẽ là người dành nhiều công sức nhất để lí giải về câu hỏi *Khối lượng từ đâu tới*. Một version ngắn của tác giả có thể tìm thấy trên mạng: http: //www. frankwilczek. com/Wilczek_Easy_Pieces/342_Origin_of_Mass. pdf

[12] Côrintô (Corinthians), Thư 1, Đoạn 6, Câu 19-20.

[13] Kane, *Perspectives on LHC Physics*.

CÁI GÌ LÀM NÊN THẾ GIỚI?

"Cái gì làm nên thế giới" và "Cái gì đã kết nó lại"



Tượng "người tư duy" của Auguste Rodin.
Những câu hỏi bất diệt.

Vật lí học hạt cơ bản mà Mô hình Chuẩn là trung tâm có mục đích trả lời câu hỏi *Vật chất được làm bằng gì ở tầng cơ bản nhất?* Có hay không những hạt cơ bản mà các triết gia cổ đại Hi Lạp đã hỏi và gọi là *atomos*, nguyên tử, từ hơn 25 thế kỉ qua? Chúng ta và vũ trụ từ đâu mà có? Thế kỉ 17 Newton diễn tả sống động: "Đối với tôi, rất có thể Chúa vào buổi đầu đã tạo vật chất bằng các hạt rắn, có khối lượng, cứng, không gì xuyên qua được và có thể chuyển động, cứng vô cùng so với các vật thể xốp được cấu tạo từ chúng; cứng đến nỗi không thể nào bẻ gãy hay làm mòn được; không quyền năng nào có thể chia nhỏ cái mà Chúa đã tạo ra trong ngày Sáng Thế."[14]

Những câu hỏi đó ngày nay đã được trả lời dứt khoát bằng Mô hình Chuẩn. Cũng chẳng phải "âm dương ngũ hành", kim, mộc, thuỷ, thổ, hoả

[14] Gottfried & Weisskopf, 3; hay Sample, 54.

của Trung Hoa tạo nên trời đất. Nhiều nền văn minh đã có nhiều phát minh lớn. Văn minh Trung Hoa phát minh kĩ thuật in, thuốc súng, hỏa tiễn, la bàn, máy ghi địa chấn, và có quan sát một cách hệ thống bầu trời. Văn minh Ấn Độ phát minh con số không rất tiện cho việc tính toán. Văn minh Aztec phát minh ra lịch tốt hơn lịch Âu châu. Họ có thể tiên đoán các hành tinh sẽ đến đâu. Nhưng không có nền văn minh nào phát triển phương pháp *thực nghiệm, truy tìm* và *nghi vấn* một cách hệ thống và triệt để, không có tư duy *phân tích, nguyên tử luận, hình học hoặc cơ giới* mà chỉ có tư duy hữu cơ như phương Đông. Tất cả những thứ này đến từ Hi Lạp cổ đại (tuy thực nghiệm chưa có nhiều thời Hi Lạp) và được truyền cho phương Tây.

Mô hình Chuẩn hiện là "biên giới giản hóa luận" (reductionist frontier) của tri thức con người hiện nay. Với Mô hình Chuẩn con người đã tiến một bước quan trọng vào trung tâm của *das ding an sich*, vật tự nó, của Immanuel Kant. Còn gì nữa hay không, giới vật lí sẽ trả lời tiếp.

CÓ HAY KHÔNG KHỐI LƯỢNG TỰ NÓ CỦA VẬT CHẤT?

Đây là một câu hỏi có tính triết học. Vật chất *không* có khối lượng tự nó. Jim Baggott trong quyển *The Invention and Discovery of the "God Particle" HIGGS* diễn tả:

> Bản năng của chúng ta là đánh đồng khối lượng quán tính (inertia mass) với số lượng chất mà một vật thể chứa. Vật thể càng chứa nhiều "chất liệu" trong nó, thì càng khó tăng tốc nó. Cơ chế Higgs đã lật ngược logic này. *Chúng ta bây giờ diễn giải, mức độ gia tốc các hạt bị kháng cự bởi trường Higgs chính là khối lượng (quán tính) của các hạt.* Quan niệm về khối lượng đã biến mất trong một cơn gió thoảng của logic. Nó được thay thế bằng các tương tác giữa các hạt vốn không khối lượng với trường Higgs.[15]

Ở một chỗ khác, ông viết:

> Trong Mô hình Chuẩn, khái niệm khối lượng, hiểu như một tính chất nội tại, hay sự đo lường của một số lượng chất liệu (substance),

[15] *Baggott*, 2012, 88.

đã biến mất. Thay vào đó, khối lượng được tạo nên từ *năng lượng* của các tương tác diễn ra giữa các trường lượng tử cơ bản và các hạt của chúng. Boson Higgs là phần của cơ chế giải thích tất cả khối lượng của tất cả các hạt trong vũ trụ được tạo ra thế nào. Tất cả vật chất trong thế giới tuy được cấu tạo bởi các quark và lepton, nhưng nó có được nhờ năng lượng thu được qua các tương tác với trường Higgs và sự trao đổi của các gluon. Không có những tương tác này, vật chất sẽ phù du và "vô thể" (unsubstantial) như chính ánh sáng vậy, và không có gì tồn tại cả trên đời.[16]

Hay:

Khối lượng, giờ đây chúng ta hiểu, không phải là một tính chất vốn có hay một phẩm chất "nguyên sinh" của các viên gạch nền tảng tối hậu của tự nhiên. Thực tế không có khối lượng tự nó. Khối lượng được cấu tạo từ năng lượng của các tương tác liên quan đến các hạt cơ bản không khối lượng.[17]

MÔ HÌNH CHUẨN CỦA CÁC HẠT VÀ LỰC

Giải thích tất cả tự nhiên là một công việc quá khó cho bất cứ ai hay bất cứ một thời đại nào. Tốt hơn là người ta làm một ít với sự chắc chắn, và để phần còn lại cho những người khác đến sau.

Isaac Newton

Mô hình Chuẩn là gì? "Chuẩn" để nói rằng mô hình đó đã trở thành *chuẩn mực* được cộng đồng vật lí hạt công nhận, được thực nghiệm xác nhận chính xác hơn cả tuyệt vời sau hai thập niên đầy rối rắm 1960-1970. Mở trang mạng của tổ chức CERN, trong phần Mô hình Chuẩn, người ta có thể đọc ngay những dòng sau đây:

Các lí thuyết và khám phá của hàng ngàn nhà vật lí học từ một thế kỉ qua đã mang lại nhận thức phi thường về cấu tạo cơ bản của vật

---

[16] *Baggott*, 2012, 221.

[17] *Baggott*, 2012, 3.

chất: tất cả mọi vật trong vũ trụ được tìm thấy có cấu tạo bởi mười hai "viên gạch cơ bản" (building block) được gọi là các hạt cơ bản (hạt vật chất), được điều hành bởi bốn lực cơ bản. Sự hiểu biết tốt nhất của chúng ta về các mối liên hệ giữa mười hai hạt này và ba trong bốn lực (của vũ trụ) được gói gọn trong Mô hình Chuẩn của các hạt và các lực. Được phát triển trong những năm 1970, nó đã thành công trong việc giải thích phần lớn các kết quả thí nghiệm và tiên đoán chính xác một số lớn đa dạng các hiện tượng vật lí. Với thời gian và qua nhiều thí nghiệm của nhiều nhà vật lí, Mô hình Chuẩn đã được chính thức chấp nhận như lí thuyết vật lí đã được thử thách.

Robert Oerter trong *The Theory of Everything* viết ở trang đầu:

"Có một lí thuyết trong vật lí cắt nghĩa được, ở mức độ sâu thẳm nhất, hầu hết mọi hiện tượng điều khiển cuộc sống hằng ngày của chúng ta. Nó tổng kết tất cả mọi thứ chúng ta biết về cấu trúc cơ bản của vật chất và năng lượng. Nó cung cấp một bức tranh chi tiết của các viên gạch cơ bản mà từ đó mọi thứ được tạo thành. Nó mô tả các phản ứng đem lại năng lượng của mặt trời và các tương tác gây ra các ánh sáng huỳnh quang rực rỡ. Nó giải thích tính chất của ánh sáng, sóng radio, và các tia X. Nó có những hệ quả cho sự hiểu biết của chúng ta về những giây phút đầu tiên của sự tồn tại của vũ trụ chúng ta, và về vật chất đã hình thành thế nào. Nó vượt trội hẳn mọi lí thuyết đã từng có về độ chính xác, tính phổ quát, phạm vi áp dụng từ rất nhỏ đến vô cùng lớn. Lí thuyết này mang cái tên khiêm tốn "Mô hình Chuẩn của các hạt cơ bản", hay ngắn gọn "Mô hình Chuẩn".

Dưới đây chúng ta sẽ lên danh sách các hạt cơ bản như những *diễn viên* trên sân khấu vi mô, đại biểu của hằng hà sa số các diễn viên khác trong một *drama* của tạo hóa, và nêu lên các lực (forces), hay tương tác (interactions) quy định các chức năng, mối quan hệ và ứng xử giữa các vai diễn. Người ta không thể không hỏi: Ai là biên đạo của vở kịch vũ trụ này? Mỗi diễn viên có "cá tính" và "nhân cách" nhất định. Chúng ta cũng sẽ nói đến các màn xuất hiện của các vai trong quá trình lịch sử. Sự xuất hiện của các vai diễn

thường đi kèm theo kịch tính của nó. Vật lí hạt như là một *drama* lớn của Hi Lạp, với từng màn đầy kịch tính.

Mô hình Chuẩn gồm có ba loại hạt cơ bản:

(i) Sáu quark và sáu lepton, là những hạt vật chất (fermion);

(ii) Bốn đại biểu của các hạt boson lực, truyền các lực, gồm có photon của ánh sáng (lực điện-từ), gluon (tám hạt) của lực mạnh, và ba boson W^+, W^-, và Z^0 của lực yếu;

(iii) Và hạt boson Higgs, với những tính chất đặc thù của nó.[18]

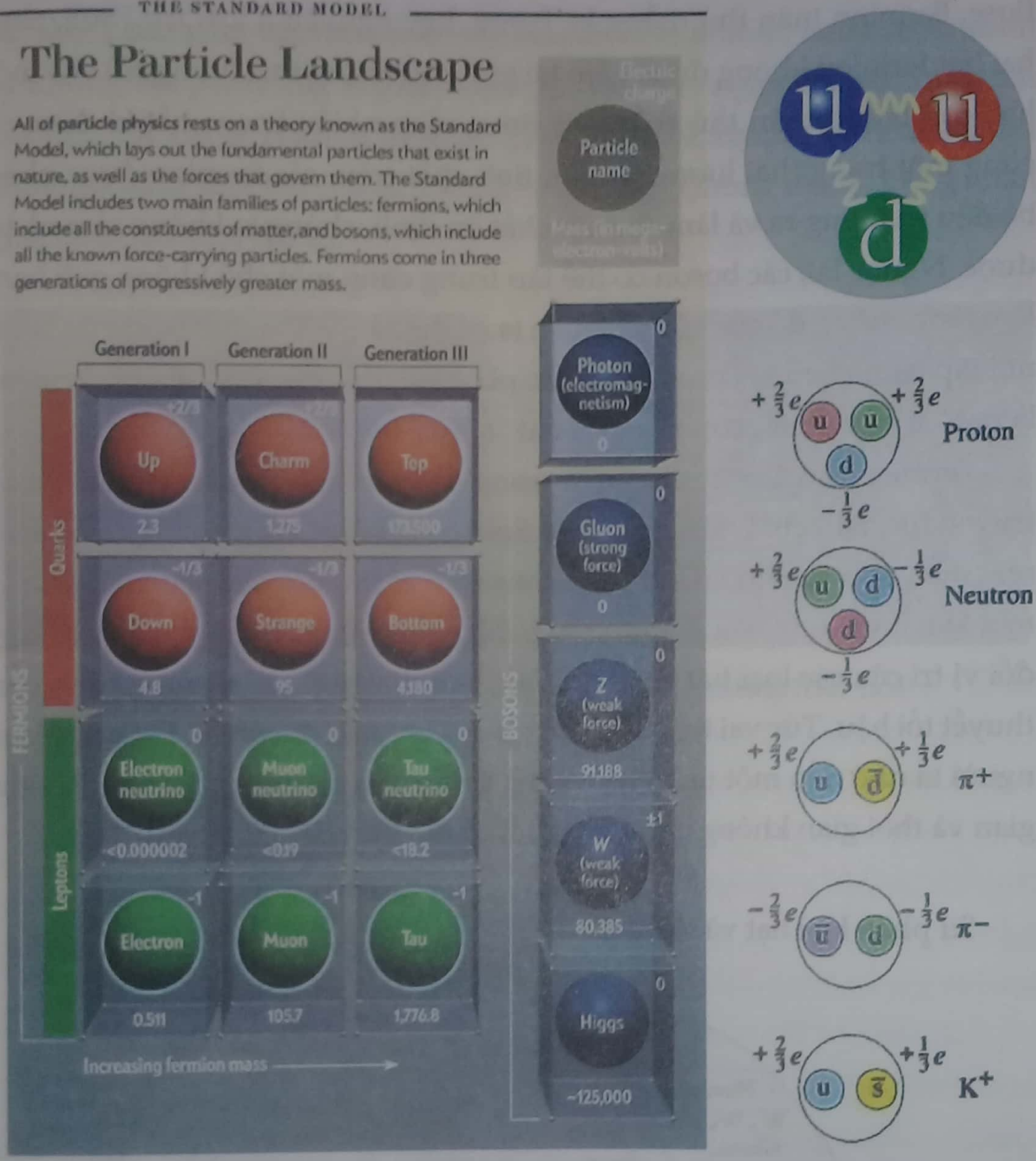
Sáu quark được gọi là sáu "hương vị" của quark, như hương vị kem cho dễ nhớ: up (u), down (d), charm (c), strange (s), top (t), bottom (b); và đặc biệt hơn, mỗi quark hương vị lại được "nhuộm" thêm ba màu (sắc), đỏ (r, *red*), lam (g, *green*), và xanh (b, *blue*), cũng như kem có nhiều màu vậy. Màu ở đây chỉ là quy ước để đảm bảo ba quark trong proton hay neutron không vi phạm nguyên lí loại trừ của Pauli, nói một cách nôm na hai hạt fermion, không thể có cùng trạng thái lượng tử cùng một lúc, một nơi (xem tiếp *bức tranh thực tế* dưới đây).

Các hạt electron (điện tử) có kí hiệu e, hạt muon μ, hạt tau τ, photon γ (kí tự Hi Lạp), proton p, neutron n. Quark có thể được kí hiệu bằng q hoặc u, d nếu là quark u, quark d v.v.

Theo Mô hình Chuẩn, các proton, và neutron được cấu tạo bằng *"bộ ba quark"*. Neutron là hạt có thể gây ra phản ứng phân hạch dây chuyền để tạo năng lượng nguyên tử. Mô hình quark này là một bước đột phá để hiểu "đáy sâu" của tạo hóa, đưa cái phức tạp của tự nhiên về cái đơn giản. Các fermion quark và lepton có spin 1/2; các boson là hạt truyền lực, có spin 1 (Xem thêm dưới đây).

---

[18] Thực ra có đến 61 hạt: 18 quark (kể cả màu), 3 hạt giống electron, 3 neutrino (lepton), cộng lại là 24; cộng thêm với các phản hạt của chúng là 48. Cộng tiếp với: 8 gluon, 1 photon, và 3 boson của lực yếu, tổng là 60; cuối cùng, cộng với hạt Higgs, tất cả là 61 (Gell-Mann, 196-97).



(Courtesy of ScientificAmerican)

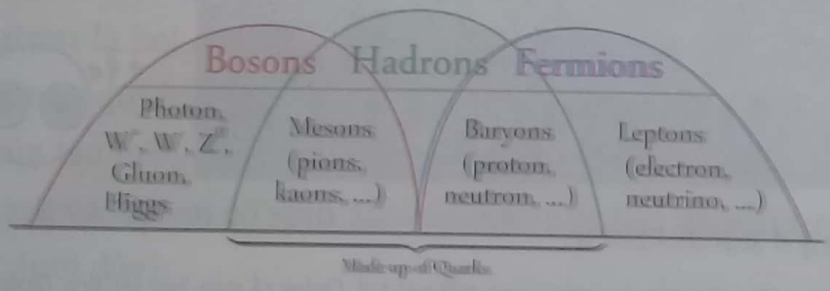
Minh họa một proton gồm hai quark u và một quark d. Chúng có màu, hay sắc tích. Gluon tác động giữa các quark để giữ chúng lại. Các quark phóng thích và hấp thu liên tục các gluon (Wikipedia). Sự cấu tạo của các proton, neutron, pion π^+, π^- và kaon K^+ bằng các quark. Các $\bar{d}$, $\bar{u}$, $\bar{s}$ là những phản hạt. Các meson cũng được cấu tạo tương tự như pion, gồm một quark và mộtphản-quark. Các con số là điện tích của các quark (Giancoli, 904).

Tên *fermion* được Paul Dirac đặt năm 1946, lấy từ tên nhà vật lí học gốc Ý Enrico Fermi, còn *boson* từ tên của nhà vật lí học Ấn Độ Satyendra Nath

Bose. Fermion tuân thủ thống kê Fermi, hay nguyên lí loại trừ Pauli, rằng hai hạt fermion không được nằm tại một chỗ (trạng thái lượng tử) vào một lúc; còn boson tuân thủ thống kê Bose, rằng nhiều boson bất kì được có cùng một trạng thái lượng tử. Với tính chất trên, các fermion được phân bố đều và mỏng ra và làm cho vật chất ổn định, chúng ta không cảm nhận được. Ngược lại, các boson có thể tập trung cùng một chỗ không giới hạn, làm tăng cường độ của chúng khiến ta có thể cảm nhận được, như tia laser, nơi tập trung liên kết cao độ của các photon ánh sáng. Có thể nói, fermion là hạt "*cá nhân tính*", còn boson là hạt "*tập thể tính*".

Fermion là các hạt vật chất, trong khi các hạt boson có chức năng truyền lực. Bản chất rất khác nhau. Spin của chúng khác nhau. Tuy nhiên, một điều rất ngạc nhiên sau này, trong thuyết *siêu đối xứng* được dự báo là một loại thuyết tối hậu, có một phép đối xứng giữa hai nhóm này: sự hoán đổi vị trí của các loại hạt này sẽ không làm thay đổi các phương trình của thuyết tối hậu. Tức vai trò của chúng là có thể hoán đổi nhau. Điều này làm người ta nhớ đến một tính chất tương tự của thuyết tương đối hẹp: không gian và thời gian không còn ranh giới, có thể biến đổi lẫn nhau![19]

Sự phân loại hạt và tên gọi:

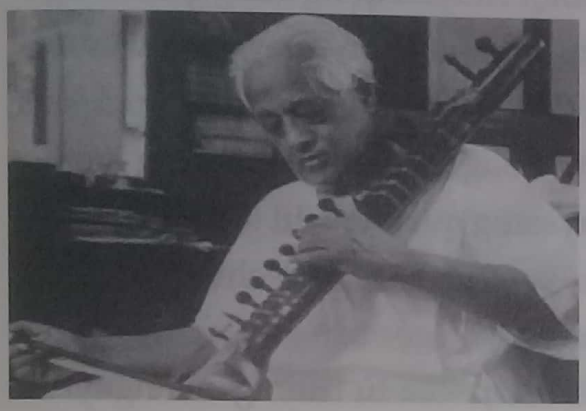


Các họ boson, hadron, meson, baryon, fermion và lepton (Nguồn: Wikipedia).

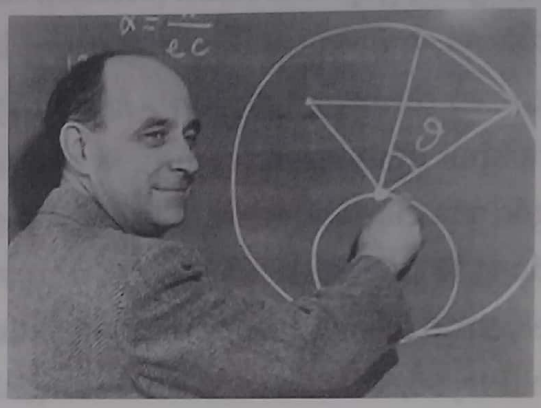
Lepton có nghĩa là "hạt nhẹ", *meson* "hạt trung" và *baryon* "hạt nặng", có nguồn gốc từ tiếng Hi Lạp. Meson là hạt được làm thành bởi hai quark, trong khi baryon bởi ba quark. *Hadron*, cũng theo tiếng Hi Lạp, có nghĩa

[19] Kane 2013, 61.

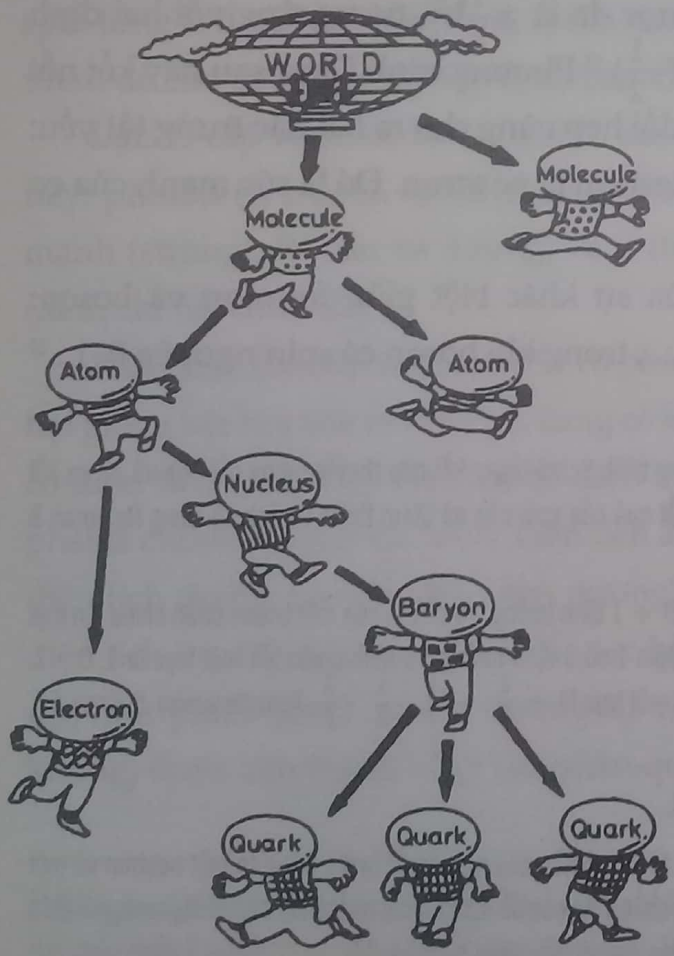
là "dày", bao gồm các meson và các baryon như proton, neutron; hadron là những hạt phản ứng với lực mạnh, có tuổi thọ ngắn. Từ đó có cái tên máy gia tốc Large Hadron Collider LHC ở CERN. Proton và neutron còn được gọi bằng một tên chung là *nuclon* (nucleon). Chúng tồn tại trong nhân (nucleus) của nguyên tử.



Satyendra Nath Bose (1894-1974)



Enrico Fermi (1901-1954)



Minh hoạ các lớp cấu trúc của thế giới vật chất từ lớn tới nhỏ (Nguồn: Nambu, 15).

Spin. Đây là một trong những khái niệm kì bí nhất của cơ học lượng tử. Khái niệm spin được hai nhà vật lí học trẻ Hà Lan S. Goudsmit và G. Uhlenbeck của Đại học Leiden đưa ra năm 1925 để cắt nghĩa hiện tượng tách vạch quang phổ của nguyên tử thành hai vạch song song rất gần nhau (cặp đôi). Hai ông cho rằng electron của nguyên tử hydro, ngoài chuyển động xung quanh nhân (orbital), còn có một chuyển động xung quanh trục của nó, một xung lượng góc, gọi là spin, như một con quay, "với vận tốc góc cố định", có độ lớn $\frac{1}{2}h/2\pi$, hay $\frac{1}{2}\hbar$ (h là hằng số Planck), ngay cả khi ra khỏi nguyên tử (Chúng ta nhớ lại rằng trong mô hình Bohr, xung lượng góc của electron trong chuyển động quay xung quanh nhân là $nh/2\pi$, trong đó n là một số nguyên). Sự tách vạch quang phổ nói trên chứng tỏ rằng electron không quay vòng với bất cứ xung lượng góc nào, nhưng nó chỉ có hai trị số, với xác suất như nhau, dọc theo trục của từ trường của nguyên tử do chuyển động của electron quanh nhân gây ra (nếu là electron tự do, thì theo trục của bất cứ từ trường nào áp vào đó). Hai thành phần của spin theo hướng này của từ trường được đo là $\pm\frac{1}{2}\hbar$[20], tương ứng với hai định hướng của nó: *up* $(+\frac{1}{2})$ hay *down* $(-\frac{1}{2})$.[21] Phương trình Dirac sau này kết nối thuyết lượng tử và thuyết tương đối hẹp cũng cho ra hai đặc trưng tất yếu: spin, và sự tồn tại của phản hạt electron là positron. Đó là sức mạnh của cơ học lượng tử tương đối tính.[22]

Spin tạo ra lằn ranh giới của sự khác biệt giữa fermion và boson: fermion có spin bán nguyên $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$,..., trong khi boson có spin nguyên 0, 1...[23]

---

[20] *Dodd*, 22. Năm 1928 Paul Dirac thiết lập phương trình Schrödinger kết hợp thuyết tương đối hẹp và rút ra kết luận rằng tất cả những tính chất của electron là kết quả của spin của nó (Xem thêm về lịch sử trong Ne'eman & Kirsh, 53-58 và Pais, 274-280).

[21] Tổng quát, nếu spin của một hạt là j, thì spin có $2j + 1$ định hướng, và độ lớn của một thành phần chiếu lên một trục có thể chiếm những trị số $j, j - 1, j - 2,..., -j$. Spin 1 có 3 định hướng, và hình chiếu lên một trục là 1, 0, - 1. Spin $\frac{3}{2}$ có 4 định hướng, và thành phần chiếu trên một trục là $+\frac{3}{2}, +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, -\frac{3}{2}$. Xem *Ne'eman & Kirsh*, 55, hay *Nambu*, 45.

[22] *Nambu*, 42-44, và xem thêm *Baggott* 2012, 5-8.

[23] Nhưng không phải hạt nào có spin 1 cũng là hạt tải lực. Nhân của nguyên tử hydro nặng có một neutron và một proton có spin 1, là một boson, nhưng nó là hạt vật chất. Cho nên số spin không nhất thiết đặc trưng ranh giới giữa hạt vật chất và hạt tải lực. Điều này chỉ đúng cho các hạt cơ bản. Xem *Nambu*, 47.

Sau electron, người ta tìm thấy các hạt cơ bản đều có spin, với những trị số rời rạc cho phép là 0, $\frac{1}{2}$, 1, $\frac{3}{2}$,... Spin của proton hay neutron là $\frac{1}{2}$.[24]

Một tính chất đặc biệt của thuyết lượng tử là trong các hiện tượng phân rã hay va chạm hạt, các spin nguyên sẽ kết hợp để cho ra các spin nguyên, trong khi các spin bán nguyên sẽ cho một spin tổng là bán nguyên, hay nguyên, tùy theo số spin kết hợp đó chẵn hay lẻ. Và sự bảo toàn spin phải được tuân thủ, spin là một *số lượng tử*. Một pion trung hòa bị phân rã thành hai photon (ánh sáng):

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$$

Pion trung hòa có spin 0. Photon có spin 1. Do đó hai photon ở vế phải tất yếu có hai spin ngược chiều nhau để triệt tiêu và cho ra spin 0. Hay xem sự tiêu hủy của một electron với positron:

$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$$

Một số chẵn fermion tay trái do đó sẽ cho một spin chẵn tay phải. Chúng ta có thể hình dung hai electron có spin ngược chiều nhau, nên có spin tổng là 0, và hai spin (bằng 1) của hai photon do đó phải có chiều khác nhau để cho ra spin tổng hợp 0, để bảo tồn spin.

Lực. Ở cấp vi mô có ba lực chính. Boson là những hạt truyền tải các lực này: photon (γ) truyền lực điện từ (electromagnetic), gluon (g) truyền lực mạnh (strong), W (âm và dương) và Z (trung hòa) truyền lực yếu (weak) (Xem chi tiết dưới đây).

Phản hạt. Các hạt fermion còn có phản hạt của chúng. Phản hạt là một hạt giống hệt hạt anh em của nó, cùng có khối lượng, spin như nhau, nhưng có điện tích khác dấu. Các hạt có điện tích có phản hạt không nhất thiết phải là chính nó. Hạt electron (điện tích âm) có phản hạt là positron, mang điện tích *dương*. Proton (điện tích dương) có phản hạt là phản-proton, với điện tích *âm*. Phản-proton được cấu tạo bởi ba phản-quark: hai phản-quark up, một phản-quark down. Tương tự với phản neutron (điện tích bằng không) được làm thành bằng các phản-quark của neutron. Photon của ánh

---

[24] Các spin có thể cộng nhau hoặc trừ nhau. Một hạt ghép chứa 3 quark với spin $\frac{1}{2}$ thì có spin hoặc $\frac{1}{2}$ hoặc $\frac{3}{2}$. Hạt ghép chứa 2 quark thì có spin 0 hoặc 1. Xem *Martin*, 29. Người ta có thể tính spin bằng thực nghiệm.

sáng có phản hạt là chính nó. Hạt và phản hạt khi gặp nhau sẽ hủy nhau, sinh ra ánh sáng (photon).

Cơ chế Higgs: Đó là cơ chế tạo khối lượng cho các hạt cơ bản (Xin xem chi tiết dưới đây). Tuy nhiên, xin mượn thêm một hình ảnh khác quen thuộc trong cuộc sống: Thế giới cám dỗ của đời thường có thể được ví là một loại "trường Higgs" (Brian Greene gọi là "bể Higgs"). Ai càng "tham sân si" càng lún sâu vào "bể khổ", như hai nhân vật Trư Bát Giới và Sa Tăng trong *Tây du kí*. Còn ai tu hành diệt dục thì ít vướng bận hơn, đi qua cõi ta bà nhẹ nhàng hơn, tiêu biểu là thầy Huyền Trang. Hạt photon không tương tác với trường Higgs, nên giữ cho nó không có khối lượng, có thể bay nhanh 300.000km/giây. Ngược lại các hạt *W, Z* của lực yếu, vì tương tác mạnh với trường Higgs, giống như hai nhân vật trong *Tây du kí* trên, trở nên "béo phì". Mỗi hạt cơ bản tương tác nhiều hay ít để có nhiều hay ít khối lượng. Hạt quark top có khối lượng khổng lồ, nhiều hơn electron tương tác với biển Higgs 350.000 lần. Đây là hạt "đại vô minh". Những quark càng nặng, "càng béo phì", thì độ bền càng nhỏ, tức tuổi thọ càng ngắn đi trước khi phân rã; và ngược lại. Logic!

THƯỢNG ĐẾ SAO CHÉP?

Các hạt neutrino là hạt sinh ra trong phân rã beta. Các cặp đôi của muon/neutrino và tau/neutrino có thể được xem là "bản sao" của cặp electron/neutrino. Bởi lẽ nếu thay khối lượng của electron bằng khối lượng của muon hay tau vào các công thức tính tiên đoán các tính chất của electron, thì người ta tìm thấy đúng những tiên đoán các tính chất của muon hay tau một cách chính xác. Cho nên tự nhiên dường như đã sao chép các electron, muon và tau lẫn nhau. Tác giả Zee trong *Fearful Symmetry* đã diễn tả một cách hình tượng và dễ nhớ trật tự cơ bản chi phối các hạt bằng cách mượn câu chuyện cổ tích cô gái Goldilocks và ba chú gấu:

> Goldilocks đi lang thang vào căn nhà vườn của các chú gấu và thấy tất cả đồ vật đều được làm thành *ba cái*. Trên bàn có ba cái chén, hoàn toàn giống nhau, trừ kích cỡ. Các nhà vật lí vốn hoang

mang. Nhưng cuối cùng họ tìm ra vũ trụ được cấu tạo thế này: Vật chất được cấu thành bởi electron, electron-neutrino, quark up, và quark down; và bởi một chùm boson chuẩn và graviton (loại hạt được giả thiết gây ra lực hấp dẫn một cách tương tự như các hạt tải lực) tác dụng lên các quark và lepton này, biến đổi chúng qua lại với nhau; từ cơ cấu này chúng ta có cả một sự huy hoàng của vũ trụ! Một thiết kế tuyệt hảo, có phải không? Nhưng khi các nhà vật lí vừa mới ngây ngất trong sự ngưỡng mộ thì nhà thiết kế vũ trụ (Ultimate Designer) ném ra một bộ hạt mới dường như không đóng vai trò gì quan trọng trong sự vận hành tốt đẹp của vũ trụ cả. Electron được lập lại trong muon, electron neutrino trong muon neutrino, quark up trong quark duyên, quark down trong quark lạ (Để phân biệt hai bộ hạt này, các nhà vật lí gọi chúng là họ electron và họ muon.).

Sự huyền bí càng lớn hơn. Bắt đầu giữa những năm 1970, các nhà thực nghiệm khám phá thêm nhiều hạt cơ bản nữa, và rõ ràng còn một họ thứ ba, gồm có những hạt được gọi là "tau", hạt tau neutrino, quark top, và quark bottom. Tau là một bản sao nặng hơn của electron, nhưng có cách hành xử giống hệt như electron hay muon. Tương tự, các thành viên khác trong họ tau là bản sao tương ứng của các hạt đồng nghiệp trong các họ electron và muon. Tự nhiên không những gây rối rắm cho nhà vật lí mà còn thách thức năng lực của chúng ta trước tác ra những cái tên duyên dáng! Top và bottom nghe rất gần gũi với up và down...[25]

Những nhận xét trên giúp chúng ta có cái nhìn tổng thể hơn. Các nhà vật lí không hiểu lí do tồn tại của các họ *muon* và *tau* trong thiết kế vũ trụ, bởi trong thực tế các họ này phân rã thành các thành viên của họ electron, chúng thường cũng không tồn tại trong vũ trụ. Vũ trụ có thể vận hành hoàn chỉnh nếu hai họ muon và tau không xuất hiện. Câu nói đầy ngạc nhiên nổi tiếng của Isidor Rabi "Ai gọi hạt muon này?" có thể đổi thành "Tại sao Ngài lập

[25] *Zee*, 258.

lại?" Ngài có thể hại chính bảng kiến trúc đơn giản và tao nhã của Ngài bằng những sự thêm thắt. Ngài có "vẽ rồng vẽ rắn" không? Các nhà vật lí không tin thế. Chắc chắn Ngài có một vẻ đẹp nào cao hơn mà họ chưa hiểu được.[26]

***

Bức tranh thực tế đơn giản hơn: vật chất, từ các loài hoa đến các vì tinh tú, thật ra được tạo ra chỉ bởi ba hạt vật chất chính: *quark up*, *quark down* và *electron* (của thế hệ thứ nhất), được chi phối bởi các gluon và photon, như vậy các hạt vật chất này mới bền, các hạt khác thì không. Đối với các khối lượng vật chất lớn như hành tinh, tinh tú trong vũ trụ, lực hấp dẫn can thiệp để kết chúng lại thành khối, là tất cả các hạt cơ bản mang ba loại tích (charge): tích điện (điện tích), tích yếu, tích mạnh (sắc tích). Hai tích yếu và mạnh không có tác dụng bên ngoài nguyên tử nên chúng ta không cảm nhận được. Các quark chỉ có tích mạnh, tương tác qua các gluon, trong khi các electron ở vòng ngoài không tương tác với gluon. Electron và quark đều có điện tích và khối lượng.

Làm sao để các hạt trên trở thành những hạt giống của vũ trụ? Các quark được các gluon kết thành proton và neutron, hay nuclon của nhân, trong khi các electron chạy vòng ngoài. Ranh giới giữa proton và neutron không tách biệt rõ ràng, bởi lực của gluon còn lọt ra ngoài một ít, các gluon chạy ra ngoài thì bị quark kéo vào, chúng cung cấp lực hút đối với các proton và neutron khác, đó chính là lực nguyên tử mạnh gói proton và neutron lại trong nhân. Lực này đủ mạnh để giữ được nhiều nuclon lại trong nhân một lúc, từ 1 đến 92 proton và với số lượng thay đổi khác nhau của neutron. Với số lượng proton tăng, lực điện từ đẩy giữa chúng cũng tăng, và nguyên tử trở nên không ổn định. Có lẽ đó là lí do tại sao chỉ có 92 proton trong nhân dù nguyên tử là trung hòa, điện âm của số electron và điện dương của số proton trung hòa nhau. Tuy nhiên, vẫn còn một phần lực điện từ lọt ra ngoài nguyên tử, tương tự như lực mạnh nằm

---

[26] *Zee*, 259.

ngoài proton và neutron, để buộc các nguyên tử vào phân tử. Nguyên tử và phân tử là những viên gạch xây dựng nên các tế bào, tảng đá và tất cả vũ trụ chúng ta.[27]

LỰC

Có bốn lực chi phối thế giới vật chất trong vũ trụ: lực hấp dẫn, lực điện từ, lực mạnh và lực yếu. Chúng tác dụng trên những phạm vi, đối tượng và cường độ khác nhau. *Lực hấp dẫn* do Newton phát hiện thế kỉ 17 có phạm vi tác động không giới hạn, giữa các vật thể kích cỡ lớn, làm chúng ta cảm nhận được ở sức nặng, sự rơi, làm cho các hành tinh quay xung quanh mặt trời, hay giữ các thiên hà. *Lực điện từ*, được phát hiện từ khoảng cuối thế kỉ 19 bởi Maxwell, *lực mạnh* có nhiệm vụ giữ các proton và neutron của nhân, được biết đến đầu thế kỉ 20; *lực yếu* trách nhiệm cho hiện tượng phân rã nguyên tử của các hạt. Ta có thể cảm nhận lực hấp dẫn và lực điện từ dễ dàng, song không thể cảm nhận các lực mạnh, yếu tác động ở phạm vi nhỏ hơn nguyên tử, nhưng các lực này lại có phần quyết định sự tồn tại của chúng ta. Ở cấp vi mô, lực hấp dẫn Newton có tác dụng không đáng kể so với ba lực còn lại, do đó không được dùng trong các tính toán; lực này chỉ gần bằng $1/10^{40}$ lực điện từ! Nếu lấy cường độ của lực mạnh làm đơn vị là 10, thì cường độ của lực điện từ là 10^{-2}, lực yếu là 10^{-6}-10^{-13}, và lực hấp dẫn là 10^{-42}:

Force	Strength	Theory	Mediator
Strong	10	Chromodynamics	Gluon
Electromagnetic	10^{-2}	Electrodynamics	Photon
Weak	10^{-13}	Flavordynamics	W and Z
Gravitational	10^{-42}	Geometrodynamics	Graviton

Cường độ lực yếu được trích dẫn khác nhau tùy theo khoảng cách (Griffiths 2011, 59).

[27] Xem *Kane* 2013, 24-25.

Tính chất các hạt tải lực:

Tính chất	Điện từ	Mạnh	Yếu	
Hạt Lực	**Photon (γ)**	**Gluon (g)**	**W^+, W^-**	**Z^0**
Tích của hạt lực:	Không có	Sắc tích	điện-yếu	Yếu
Tác dụng lên:	quark & lepton có điện tích	chỉ quark và gluon	tất cả quark và lepton	tất cả quark và lepton
Tầm hoạt động:	vô hạn (giảm theo $1/d^2$)	$<10^{-14}$[m] (bên trong hadron)	$< 2x10^{-18}$ [m]	$< 2x10^{-18}$ [m]
Chịu trách nhiệm cho:	hóa học, tính dẻo và từ	giữ các hadron và nhân nguyên tử	phóng xạ	phóng xạ

Tất cả các quark, lepton, và cả W^+, W^-, và Z^0 mang tích yếu.

Bốn lực đều ảnh hưởng đến sự tồn tại của vũ trụ và con người. Không có lực hấp dẫn, sao và hành tinh sẽ không hình thành. Không có lực điện từ, ánh sáng và nguyên tử không thể tồn tại. Không có lực mạnh, các nhân nguyên tử sẽ không có. Không có lực yếu, các quá trình cơ bản để mặt trời hoạt động sẽ vắng bóng, các nguyên tố nặng cần thiết cho sự sống sẽ không thể được sinh ra trong các supernova. Nói tóm lại, thiếu một trong các lực, sẽ không có sự sống.

Cách tương tác của các lực: Trong thuyết trường lượng tử, các hạt tương tác với nhau theo các lực trên bằng cách trao đổi các hạt boson tải lực tương ứng, tương tác điện từ bằng trao đổi các hạt photon, tương tác mạnh bằng các gluon, tương tác yếu bằng các *W* và *Z*. Một cách tương tự, người ta nghĩ rằng lực hấp dẫn cũng được thực hiện như thế bằng một hạt gọi là graviton, nhưng graviton chưa tìm thấy. Quan niệm tương tác bằng trao đổi các hạt tải lực đã được Hideki Yukawa đề xuất những năm 1930.

LỰC ĐIỆN TỪ

Lực điện từ tác dụng lên các hạt mang điện tích (các lepton e, μ, τ, các quark, và boson W). Các hạt photon, neutrino và gluon ngược lại không chịu tác dụng của lực điện từ bởi chúng không có điện tích. Các nguyên tử được cấu tạo bằng electron, các proton và neutron. Các photon là chất keo buộc các electron với nhân. Lực điện từ được thể hiện bằng sự trao đổi thường xuyên các photon giữa nhân và các electron của nó. Nguyên tử trung hòa, vì số điện tích của electron và của proton trung hòa nhau, có bao nhiêu proton là có bấy nhiêu electron. Tuy nhiên, vẫn có một lực điện từ thoát ra vùng cận nguyên tử có thể cảm nhận được, và lực đó xác định tất cả các tính chất của vật chất xung quanh chúng ta như cây cỏ, đồ dùng, sông núi v.v. Các hiện tượng được nghiên cứu trong các môn vật lí nguyên tử, phân tử, chất rắn, khoa học vật liệu, hóa học, và nhiều thứ khác đều do lực điện từ gây ra.[28]

Nguyên tử thật ra phần lớn là *không gian rỗng*, 99,9999999999999% rỗng[29], và bản thân vật chất, thân thể chúng ta, phần lớn cũng rỗng như thế! Nhân chứa hầu hết khối lượng của nguyên tử, bằng 99,95% khối lượng của cả nguyên tử, giống như Mặt Trời chứa một khối lượng đến 99,9% khối lượng của toàn Hệ Mặt Trời, trong khi nhân chỉ chiếm một phần triệu triệu thể tích của nguyên tử. Một proton hay neutron có khối lượng bằng 2.000 lần khối lượng của một electron. Nguyên lí Pauli ngăn các electron tụ lại, mà phải phân phối rộng ra. Các lực điện từ của các hạt có điện tích trong nguyên tử chiếm hết "không gian rỗng" và làm cho vật chất "cứng" lại, khiến chúng ta tuy rỗng nhưng không thể đi xuyên qua bức tường vì cả hai đều cứng.[30] Trái táo rơi xuống là do lực Newton, nhưng nó va chạm mặt đất và dừng lại đó, hay bị nẩy lên, là do lực điện từ.

---

[28] *Kane* 1996, 61-62.

[29] *Close* 2000, 124.

[30] *Martin*, 11.

LỰC YẾU

Lực yếu, tuy yếu về cường độ hơn so với hai lực điện từ và lực mạnh, có tác dụng rất ngắn so với các lực khác, không có những tác dụng dễ thấy trong đời thường, nhưng lại có vai trò vô cùng quan trọng đối với đời sống trên hành tinh, với sự tổng hợp nguyên tử trên mặt trời làm cho mặt trời chiếu sáng, và tạo ra sự phân hạch trong các lò phản ứng hạt nhân. Nó có thể làm các hạt thay đổi bản chất: làm các nhân nguyên tử không bền, hạt này biến thành hạt khác, các quark và lepton nặng biến thành các quark và lepton nhẹ hơn. Hạt tải lực của lực này là W^+ và W^-, mãi đến đầu những năm 1980 mới được phát hiện. Chúng giống photon, có spin 1 (boson), nhưng có điện tích và rất nặng, điều làm cho tầm tác động của lực yếu ngắn. Hạt tải lực thứ ba của lực yếu là Z^0, trung hòa, không có tác dụng phân rã như các W, nhưng có loại tác dụng khác là *dòng trung hòa* (neutral current). Nó cho phép các neutrino va chạm với các hạt khác mà không thay đổi bản sắc. Một trong những tính chất quan trọng của lực yếu là nó gây ra hiện tượng phân rã beta và hiện tượng phá vỡ đối xứng gương (P).

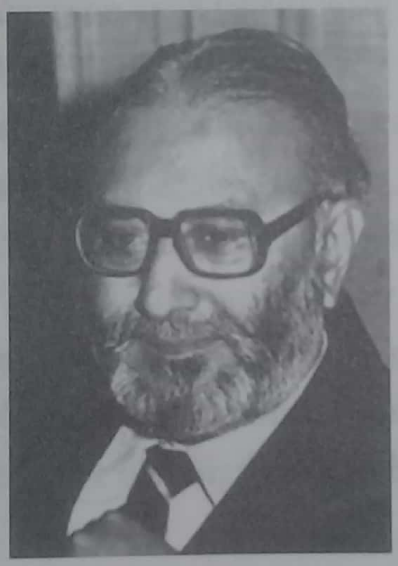
Sau năm 1970 người ta hiểu rõ: lực yếu và điện từ được *thống nhất* với nhau thành lực điện-yếu. Đó là một khám phá rất quan trọng, một trăm năm sau sự thống nhất lực điện-từ của Maxwell. Uỷ ban Nobel Vật lí, trong một thông cáo báo chí năm 1979 dành cho Shedon L. Glashow, Abdus Salam và Steven Weinberg, những người đã có công thống nhất lực yếu và lực điện từ thành *lực điện-yếu*, đã mô tả tầm quan trọng của khám phá này như sau:

> Mặc dù *tương tác yếu* là rất yếu so với các tương tác mạnh và điện từ, nó có tầm quan trọng lớn về nhiều phương diện. Cường độ của nó cũng quan trọng không ít. Năng lượng của mặt trời, tác nhân tối quan trọng cho sự sống trên trái đất, được sinh ra khi hydro được tổng hợp hay cháy thành helium trong một chuỗi phản ứng nguyên tử diễn ra trong lòng mặt trời. Phản ứng đầu tiên trong chuỗi này, sự biến đổi hydro thành hydro nặng (deuterium), được gây ra bởi lực yếu. Không có lực này, sự sản sinh năng lượng mặt trời sẽ không thể xảy ra. Lại nữa, nếu lực yếu mạnh hơn nhiều thì

tuổi thọ của mặt trời sẽ quá ngắn ngủi để sự sống có thể tiến hoá trên mọi hành tinh. Tương tác yếu có ứng dụng thực tiễn ở dạng tia phóng xạ được dùng trong y học và công nghệ, nói chung ở dạng phóng xạ beta, và trong sự phân rã beta của đồng vị cácbon thành nitơ, chất nền tảng cho phương pháp cácbon-14 để xác định tuổi của các di cảo hữu cơ khảo cổ học.[31]

Newton, ba thế kỉ rưỡi trước, đâu biết các hiện tượng nguyên tử diễn ra trên mặt trời tạo ra nguồn năng lượng thế nào, nên vào những ngày cuối đời, ngồi trước lò sưởi củi cháy bập bùng, ông tư biện rằng nguồn lửa trên mặt trời là do các sao chổi đều đặn châm thêm vào theo chu kì của chúng như những khúc củi để mặt trời tiếp tục sáng! Một ý tưởng ngộ nghĩnh như truyện thần thoại.[32]

Sheldon Lee Glashow



Abdus Salam

Steven Weinberg

Giải Nobel 1979 cho công trình thống nhất lực điện-yếu.
(Courtesy of Nobel Committee).

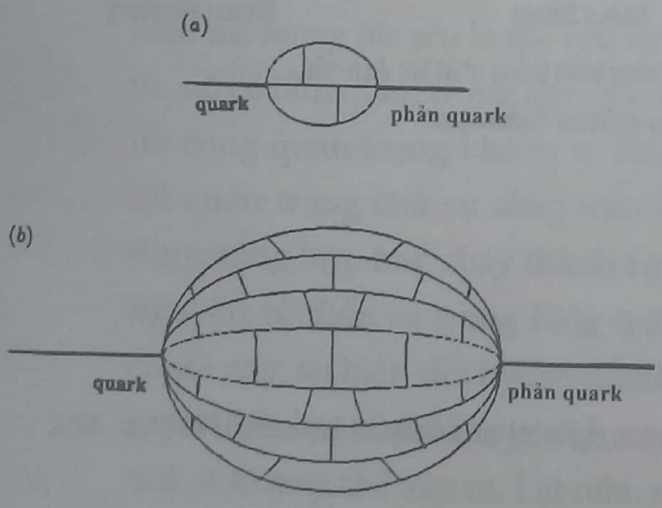
---

[31] *Smetham*, 2013, 49, hay http: //www. nobelprize. org/nobel_prizes/physics/laureates/1979/press. html.

[32] *Gleick*, 2003, 190.

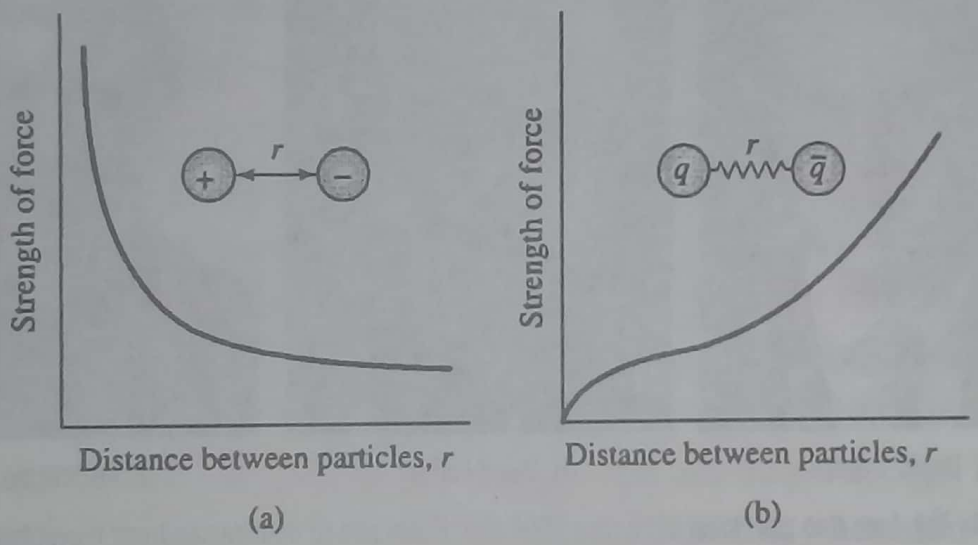
LỰC MẠNH

Lực này, còn gọi là "sắc lực" (hay lực màu), lực của các màu sắc *đỏ, lam, xanh* của các quark và của tám gluon tải lực mạnh trong QCD, được đặt tên bởi Gell-Mann và Fritzsch đầu những năm 1970. Gluon có nghĩa là keo, *glue*, một từ ngữ của Gell-Mann. Gluon không những truyền sắc lực cho các quark mà bản thân chúng cũng tham gia vào tương tác với nhau. Chúng tuôn ra giữa các quark và trao đổi với nhau, giữ các quark lại với nhau. Về cơ bản thuyết QCD giống như thuyết QED. Nhưng đi vào chi tiết, sắc lực phức tạp nhất trong tất cả các lực. Nó có thể đẩy hay hút các màu khác nhau hay giống nhau, như lực điện. QED có một hạt tải lực là photon, trong khi QCD có đến tám gluon. Các gluon này không có khối lượng như photon, nhưng có "sắc tích", có màu, nên gắn liền cuộc đời chúng trong các *trại giam (nô lệ) hồng ngoại* cùng với các quark quản lí chúng. Nhưng rất khác với các hạt tải lực điện từ photon vốn là những hạt không có điện tích nên chúng có thể đi ngang qua nhau mà không có tương tác, các gluon vì mang sắc tích nên tương tác với nhau, bằng cách phát ra những gluon khác; rồi đến lượt các gluon này lại tương tác với các gluon có trước, v.v. Khi hai quark càng xa nhau, càng có nhiều gluon xuất hiện tham gia tương tác, tương tác càng nhiều, lực kéo lại càng mạnh để không cho quark ra khỏi vỏ hadron. Đó là hiệu ứng *giam, nhốt* (confinement). Không có quark tự do nào xuất hiện riêng lẻ trong các thí nghiệm cả.



Minh họa hiện tượng giam nhốt trong một meson. (a) Ban đầu hai quark và phản-quark (khác loại) gần nhau, được nối kết bởi một ít tuyến lực mạnh. (b) Nhưng khi hai quark xa nhau, mạng lưới tương tác của các gluon tăng lên như một mạng dây thừng chằng chịt nhằm giữ chúng lại. Quark càng cố gắng xa nhau, lực kìm giữ chúng càng mạnh (Nguồn: Fraser 1997, 106).

Ngược lại, khi hai quark gần nhau, tương tác sẽ rất yếu, số gluon hoạt động ít đi, các quark được *tự do một cách tiệm cận* (asymptotic freedom). Lực mạnh hoạt động giống như một băng cao su nối hai quark ở hai đầu. Lực kéo lại của băng cao su sẽ tăng lên theo khoảng cách, khi băng cao su được căng ra. Ngược lại, nếu độ căng giảm, hai quark thấy sức kéo cũng giảm, và cuối cùng như được tự do. Lực mạnh "ngược đời" so với các lực khác, so với lực hấp dẫn hay lực điện từ, các lực này giảm đi khi khoảng cách tăng (tỉ lệ nghịch với bình phương khoảng cách).



Minh họa sự khác nhau giữa lực điện từ và lực mạnh. (a) Lực điện từ hút giữa hai hạt có điện tích tăng khi các hạt đến gần, và giảm đi khi các hạt xa nhau. (b) Nhưng lực mạnh giữa các quark lại tiến về không khi chúng đến gần, và tăng mạnh lên khi các quark xa nhau (Nguồn: Baggott 2012, 136).

Câu hỏi đầu tiên được đặt ra là: Lực nào buộc các proton và neutron lại để làm thành nhân nguyên tử? Đó chính là sắc lực thoát ra ngoài các neutron và proton, giống như lực điện từ thoát ra ngoài các nguyên tử, mặc dù nguyên tử là trung hòa, như đã nhắc đến ở trên. Nó vẫn đủ mạnh để chiến thắng lực đẩy điện từ giữa các proton (có cùng điện tích dương), giữ các proton, và các neutron lại.[33] Người ta đã tin rằng phần lực mạnh nằm

[33] *Kane*, 1996, 62.

bên ngoài đó thể hiện qua cách trao đổi các meson (gồm một quark và một phản-quark) chạy qua lại giữa các proton và neutron, một cơ chế được nhà vật lí đoạt giải Nobel người Nhật Bản Hideki Yukawa (1901-1981) đề xuất những năm 1930.[34]Ngày nay lực mạnh ban đầu của Yukawa được xem như một hiệu ứng phụ của một lực mạnh (hơn) giữa các quark mà các hạt tải là những gluon.[35]

David J. Gross H. David Politzer Frank Wilczek

Ba ông được trao giải Nobel Vật lí năm 2004 cho "Khám phá tự do tiệm cận trong thuyết tương tác mạnh". Phần kia, hiện tượng giam nhốt của quark và gluon trong hadron, chưa bao giờ được chứng minh toán học một cách chặt chẽ, mặc dù người ta vẫn tin nó. Viện Clay đã treo giải thưởng 1 triệu Đô la cho ai chứng minh được (Weinberg 2013) (Ảnh: Courtesy of Nobel committee).

HIDEKI YUKAWA VÀ CÁC MESON hay là LỰC TRUYỀN THẾ NÀO?

Khi các proton và neutron, gọi chung là nuclon, được phát hiện trong nhân nguyên tử thì vấn đề được đặt ra: lực nào giữ chúng lại trong nhân? Theo thuyết lực yếu của Fermi, thì lực yếu lại quá yếu để làm nhiệm vụ nói trên. Phải là một *lực mạnh*, có phạm vi tác động thật ngắn. Năm 1935 nhà vật lí Hideki Yukawa đưa ra một ý tưởng cách mạng có tính lí thuyết, cho

[34] *Mee*, 204 và Aczel, 144-145.

[35] *'t Hooft*, 30.

rằng, tương tự như lực điện từ giữ các electron được tạo ra do sự trao đổi qua lại hạt photon của ánh sáng, lực mạnh cũng được tạo ra do sự trao đổi qua lại của một loại hạt mà ông gọi là hạt pion (kí hiệu π), hay pi-meson. Hạt này nhảy qua nhảy lại giữa các nuclon để tạo ra lực mạnh. Yukawa cho rằng lực yếu cũng được hình thành như thế với những hạt tải lực khác. Sử dụng *nguyên lí bất định* của Heisenberg, Yukawa ước tính được khối lượng của pion là khoảng 200 lần khối lượng của electron, và hằng số tương tác phải bằng 10^{14} lần hằng số tương tác của lực yếu Fermi. Meson ám chỉ "hạt trung bình", nặng hơn electron và nhẹ hơn proton và neutron (Ngày nay khối lượng của pion được biết là 135-140 MeV (Mega electron Volts)).

Ý tưởng của Yukawa trước tiên bị bỏ quên, nhưng hai năm sau, Carl Anderson và S. Neddermeyer của Đại học Celtech (Anderson là người đã tìm ra phản hạt positron của electron) đã phát hiện từ các tia vũ trụ một loại hạt có khối lượng giống như hạt Yukawa đã tiên đoán cho pion, nặng hơn 207 lần electron, và tưởng rằng đó chính là pion của Yukawa. Nhưng M. Converi, E. Pancini và O. Piccioni từ Ý chứng minh rằng không đúng như vậy, hạt tìm thấy có tương tác với các nuclon khoảng 10^{12} lần nhỏ hơn cường độ cần thiết để giải thích lực mạnh. Hạt tìm thấy được gọi là *muon* (kí hiệu μ). Nhưng khám phá trên làm cho dư luận chú ý hơn đến hạt của Yukawa.

Mãi đến năm 1947 hạt pion mới được tìm thấy do C. F. Powell (và G. Occhialini), từ các tia vũ trụ, có khối lượng gần đúng như Yukawa tiên đoán, xuất hiện ở ba dạng có điện tích dương π^+, âm π^-, và trung hòa π^0. Các hạt này có tương tác rất mạnh với các nuclon và đúng là pion của Yukawa. Những pion có điện tích phân rã nhanh chóng thành muon và neutrino, vì thế muon được quan sát trước, pi-meson đã biến mất sau phân rã. Còn pion trung hòa phân rã thành các tia gamma. Yukawa được trao giải Nobel hai năm sau, 1949, là giải Nobel đầu tiên cho Nhật Bản, bốn năm sau Thế chiến thứ II. Năm sau Powell cũng được trao giải Nobel.

Có điểm giống nhau giữa photon và pion. Các nguyên tử khi va chạm nhau đủ lâu, chúng sẽ phát ra ánh sáng, tức photon, giống như khi vật chất được đun nóng lên (nguồn gốc của thuyết lượng tử!). Tương tự, ở cấp

10.000 lần nhỏ hơn, các nhân nguyên tử cũng có thể làm được như thế. Khi chúng va đập nhau với năng lượng đủ cao, các pion sẽ được phát ra. Ngày nay người ta biết rằng, trên tầng khí quyển cao, các nguyên tử của vũ trụ bay đến với một năng lượng rất cao, va chạm với các nguyên tử của bầu khí quyển. Chúng sẽ lập tức tạo ra rất nhiều hạt pion, theo đúng thuyết Yukawa. Nhưng các pion mang điện tích chỉ tồn tại khoảnh khắc nhỏ hơn một phần mười triệu giây và phân rã thành các muon và một neutrino. Các neutrino thường thoát khỏi sự kiểm tra của con người, nhưng muon thì có thể bị khám phá ở các tầng khí quyển thấp hay thậm chí ở độ sâu vài trăm mét dưới đất, bởi chúng không tương tác mạnh cho nên có thể xuống sâu hơn. Trước những tính chất lạ ấy, nhà vật lí hạt giải Nobel I. I. Rabi, trong lúc ngồi trong một nhà hàng Tàu, buông ra câu nói nổi tiếng: "Ai gọi hạt muon này vậy?"[36]

Về sau, thuyết lực mạnh của Yukawa được thay thế bằng sắc động học, mạnh hơn, với các hạt cơ bản là quark và hạt lực là gluon. Nhưng ý tưởng lực được truyền bởi sự trao đổi các hạt đã trở thành khái niệm chung của vật lí hạt.

TRƯỜNG

Trường (field) là một khái niệm rất cơ bản trong vật lí lượng tử, khởi đầu từ ý tưởng của Faraday về từ trường phân bố xung quanh một thanh nam châm, được Maxwell sau đó thiết lập trong các phương trình *thuyết điện từ* toán học mang tên ông, mô tả trường điện từ bao gồm các hiện tượng điện và ánh sáng; rồi tiếp tục được Einstein tiếp thu trong *trường hấp dẫn* của thuyết tương đối rộng. Từ đó nó trở thành phổ biến trong vật lí. Khái niệm trường khắc phục được nhược điểm của cơ học cổ điển về "tác dụng xa" của các sự vật như trong lực hấp dẫn Newton, hoặc tương tác giữa hai điện tích, nó giải thích được tác dụng đó một cách chính xác. Một sự nhiễu loạn tại vật chất gây ra trường, và được truyền đi với vận tốc ánh sáng. Tác

[36] 't Hooft, 23, 26.

dụng của trường do đó không phải tức thì như người ta lầm tưởng. Một sự vật bước vào trường của một sự vật khác sẽ chịu sự tác động của trường ấy, như một người ngồi trên nệm mút bị lún xuống, như cách giải thích trường hấp dẫn Einstein.

Thuyết trường lượng tử, tuy nhiên, đi xa hơn một bước, vừa có trường, vừa có lượng tử, mô tả các trường và các lượng tử tương tác. Nguyên nhân của một trường là một loại *tích* (charge) theo nghĩa rộng; tích điện là một ví dụ thông thường. Trường được *lượng tử hóa* (quantized) thành các bó năng lượng, quanta, và sự *trao đổi* qua lại các lượng tử này chính là tương tác giữa hai đối tượng mang tích của thuyết này. Hai ví dụ trong Mô hình Chuẩn: a) Thuyết QED với *điện tích* như nguyên nhân của trường, và lượng tử của trường là các hạt *photon*. Tương tác giữa hai hạt mang điện tích là sự trao đổi qua lại các photon; b) Thuyết QCD với *sắc tích* của quark (ba màu đỏ, lam, xanh) là nguyên nhân của trường, và lượng tử của trường là các hạt *gluon*. Các hạt mang sắc tích tương tác nhau qua sự trao đổi của các gluon.[37] Tương tự trong trường hợp lực hấp dẫn, người ta cho rằng có một loại hạt graviton; nhưng điều này chưa được phát hiện.

Nếu trước đây người ta diễn giải "tác dụng xa" là do trung gian của trường, thì nay trong thuyết trường lượng tử, người ta nói rằng nó được trung gian bởi sự trao đổi của các hạt lượng tử của trường. Sự khác biệt là các *lượng tử*. Vật lí lượng tử được xây dựng trên hai khái niệm là *vật chất* và *trường*, nghĩa là một lí thuyết *nhị nguyên* (dualistic).

Thuyết trường lượng tử được áp dụng thích hợp cho thế giới các vật thể kích thước *rất nhỏ* và chuyển động *rất nhanh*, thế giới các *hạt cơ bản* có hai tính chất này. Thuyết trường lượng tử phải tương thích với cơ học lượng tử và thuyết tương đối hẹp. Mô hình Chuẩn hoạt động với các khái niệm *trường* trong các phương trình chứ không phải với hạt như cơ học cổ điển, và các hạt là sự thể hiện của các trường này. Mỗi hạt cơ bản có một trường tương ứng: các trường electron, quark, lepton và trường boson. Khái niệm trường được Dirac nêu lên lần đầu tiên, sau đó đến QED mới phát huy tác dụng đích thực

---

[37] *Goldmann Lexikon*, 504.

của nó trong vật lí lượng tử tương đối tính. Thuyết trường lượng tử thành công đầu tiên là thuyết điện động học QED của Richard Feynman, Julian Schwinger và Sin-Itiro Tomonaga (và Freeman Dyson). Thuyết này diễn giải tương tác của hạt vật chất electron với photon thông qua trường điện từ của hạt này là trường truyền lực của photon. Thuyết này đã dọn đường cho Mô hình Chuẩn[38] (Xem thêm *Vẻ Đẹp của Mô hình Chuẩn* dưới đây).

PHẦN II

(Nhưng) tìm cách ứng dụng một phép thử bằng thực nghiệm sẽ chứng tỏ sự thiếu hiểu biết về khác biệt giữa bản chất con người và thần thánh; bởi vì chỉ có Thượng Đế mới có tri thức và quyền năng làm cho Ngài có đủ khả năng hợp nhiều viên gạch cấu thành vào một và tách sự thống nhất đạt được thành những viên gạch cấu thành của nó, nhưng không người nào có thể hoặc sẽ có năng lực làm được việc đó cả.

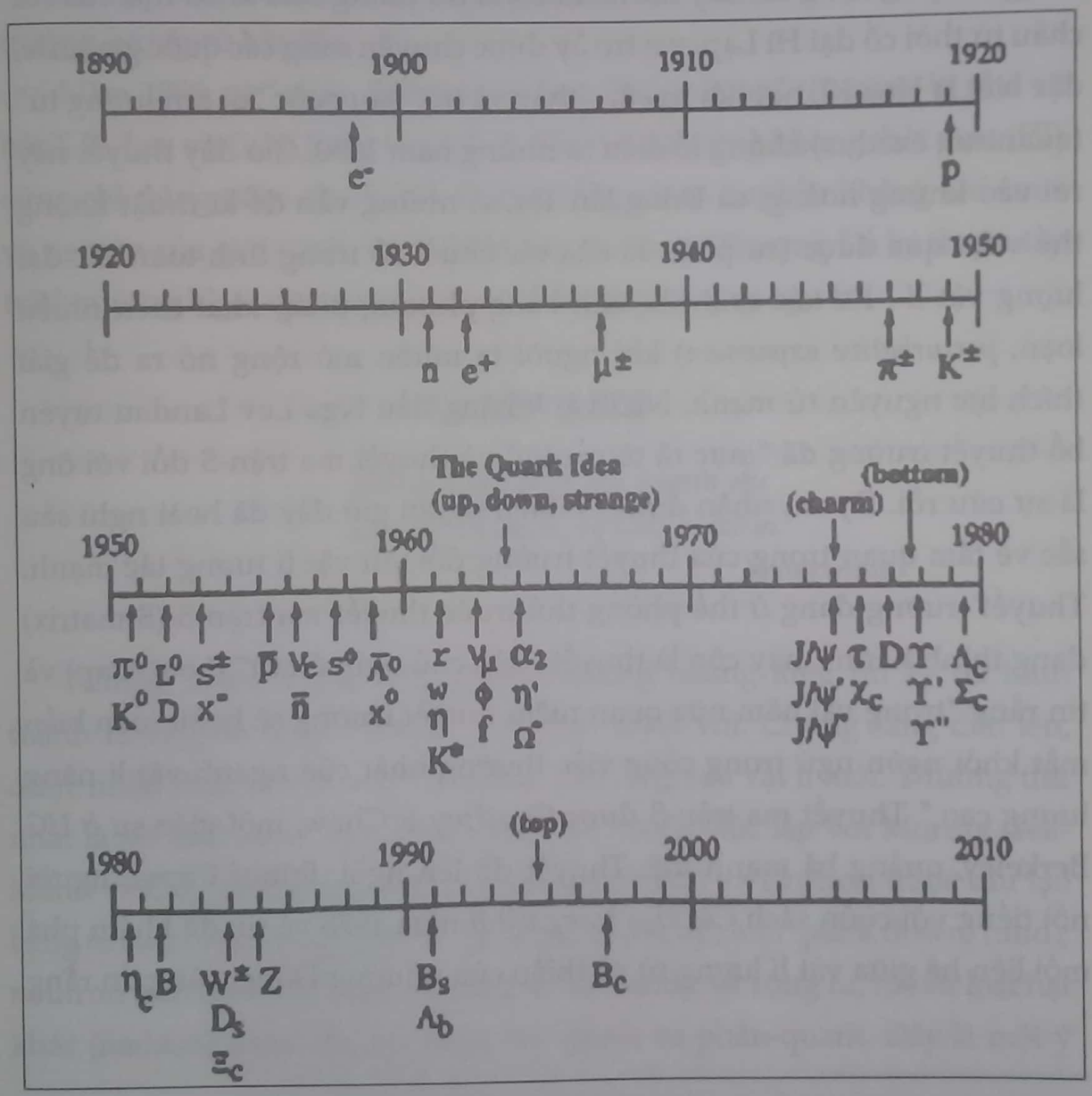
Plato, *Timaeus*

KHỦNG HOẢNG VÀ CỨU TINH HAY LÀ SỰ HÌNH THÀNH MÔ HÌNH CHUẨN

Sau khi các pi-meson được khám phá, người ta thở phào. Nhưng năm 1947 nhiều hạt nặng như "thiên thạch" của thế giới vi mô "hạ san" từ các tia vũ trụ, đó là những Kaon. Từ năm 1950 một loạt hạt mới xuất hiện. Những năm 1950 và 1960 thật là rối rắm cho các nhà vật lí hạt. Cả một "vườn thú" hạt lần lần được tìm thấy mà người ta chẳng biết chúng từ đâu đến và để làm gì? Công thức "nguyên tử = electron + proton + neutron" bị lung lay, proton và neutron có lẽ không còn là hạt cơ bản nữa. Cấu trúc nào nằm đằng sau vườn thú hạt kia? Giữa thế kỉ 20 có hai nguồn cung cấp các hạt cơ bản phong phú: từ các tia vũ trụ, và từ các máy gia tốc đang trong

[38] *Aczel*, 98-100.

giai đoạn phát triển, đã đưa tới một sự tăng vọt các hạt cơ bản: các pion, kaon, eta meson, rho meson, hyperon (theo tiếng Hi Lạp). Fermi phải thốt lên: "Người bạn trẻ ơi, nếu tôi có thể nhớ hết tên các hạt này, tôi sẽ thành nhà thực vật học mất." Hay Willis Lamb trong diễn từ nhận giải Nobel của mình đã diễn tả hóm hỉnh tình hình "lạm phát" hạt như sau: "Người tìm ra một hạt cơ bản mới thường được thưởng giải Nobel, nhưng bây giờ một sự khám phá như thế cần phải bị phạt mười ngàn Đô la Mĩ."



Thời biểu phát hiện các hạt từ cuối thế kỉ 19 đến hết thế kỉ 20.
(Barnett et al., 31).

Những năm đó, thuyết trường lượng tử, điện động học lượng tử QED, vốn được tin tưởng tuyệt đối một thời, cũng bị đặt lại vấn đề. Feynman đã gọi thuyết này là "viên ngọc của vật lí", và quyển sách nổi tiếng của ông có tên *QED, Thuyết lạ lùng của ánh sáng và vật chất*. Ba nhà vật lí học sáng giá Julian Schwinger, Richard Feynman và Sin-Itiro Tomonaga của Hoa Kì và Nhật Bản đã chia nhau giải Nobel năm 1965[39]. Giải Nobel này cũng là tiếng chuông báo hiệu sự chấm dứt vai trò thống soái của Âu châu trong thuyết lượng tử, hay nói xa hơn vai trò thống soái khoa học của Âu châu từ thời cổ đại Hi Lạp, vai trò ấy được chuyển sang các quốc gia khác, đặc biệt là Hoa Kì, nơi hội tụ của "thầy và trò" sau cuộc "di tản lượng tử" (quantum exodus) khổng lồ diễn ra những năm 1930. Giờ đây thuyết này rơi vào khủng hoảng, cả Đông lẫn Tây, vì những vấn đề kĩ thuật không thể vượt qua được (sự phân kì của các chuỗi số trong tính toán các đại lượng vật lí như xác suất khi tính bằng phương pháp khai triển nhiễu loạn, *perturbative expansion*) khi người ta muốn mở rộng nó ra để giải thích lực nguyên tử mạnh. Nhà vật lí hàng đầu Nga Lev Landau tuyên bố thuyết trường đã "mục rã từ cốt lõi" và thuyết ma trận-S đối với ông là sự cứu rỗi. Dyson nhận định: "Nhiều người giờ đây đã hoài nghi sâu sắc về tầm quan trọng của thuyết trường đối với vật lí tương tác mạnh. Thuyết trường đang ở thế phòng thủ trước thuyết ma trận-S (S-matrix) đang thịnh hành", hay còn là thuyết "dân chủ nguyên tử" (bootstrap) và tin rằng "trong vài năm nữa quan niệm thuyết trường sẽ hoàn toàn biến mất khỏi ngôn ngữ trong công việc thường nhật của ngành vật lí năng lượng cao." Thuyết ma trận-S được Geoffrey F. Chew, một giáo sư ở UC Berkeley, quảng bá mạnh mẽ. Thuyết đó lên ngôi. Fritiof Capra, người nổi tiếng với cuốn sách *Cái Đạo trong vật lí* năm 1975 và tin đã khám phá mối liên hệ giữa vật lí lượng tử và thiền của phương Đông, cũng tin rằng

---

[39] Feynman, Schwinger và Tomonaga đáng lẽ nhận giải Nobel từ nhiều năm trước, nếu không có thái độ tiêu cực của Bohr đối với thuyết này. Giải Nobel được công nhận sau khi Bohr qua đời. Khi giải được công bố, Oppenheimer gửi cho Feynman từ Tel Aviv một điện tín với một chữ vỏn vẹn: "Enfin" ("Cuối cùng" rồi cũng được, tiếng Pháp). Xem *Ne'eman & Kirsh*, 59.

thuyết ma trận-S là sự song song thuyết phục nhất với thuyết thần bí phương Đông.[40]

"Sự thành công của QED những năm cuối cùng của thập niên 40 thế kỉ 19 đã tạo ra một sự phát triển mạnh mẽ trong ngành vật lí hạt cơ bản, nhưng... chẳng bao lâu một sự đổ vỡ niềm tin xảy ra, thị trường bị sụp đổ, cổ phiếu của thuyết trường lượng tử rớt giá trên thị trường chứng khoán vật lí, và cuộc suy thoái thứ hai bắt đầu, kéo dài gần hai mươi năm" như Weinberg bình luận tình hình những năm 1950. Cuộc "vỡ mộng" với thuyết trường lượng tử bắt đầu.

Năm 1956, cả "phép đối xứng gương thiêng liêng" (*P*) cũng bị phá vỡ bởi T. D. Lee và C. N. Yang và bà C. S. Wu. Sự đối xứng không thời gian (PT) cũng chỉ đúng tiệm cận. Đó là những tiếng sét xé tan bầu không khí êm ả và tự mãn của giới vật lí. Pauli đã không tin rằng "Thượng Đế lại thuận tay trái", nhưng Ngài quả đã làm như thế. Sự tuyệt vọng ngự trị.

MÔ HÌNH QUARK

Những gì một cô gái tìm ở người yêu
Là quark là duyên, và tính lạ, anh ơi.[41]

Hawkwind

Nhưng chính trong những năm khủng hoảng lòng tin ấy đã hình thành những tia sáng ý tưởng "cứu rỗi" tuyệt vời. Chúng sáng dần lên, được nhận thức sâu dần và trở thành nền tảng của vật lí mới. Ý tưởng thứ nhất là *mô hình quark* năm 1964, được đề xướng độc lập bởi Murray Gell-Mann và George Zweig, cho rằng các hạt proton và neutron được cấu tạo bằng *ba quark* bên trong: proton chứa hai quark up, một quark down: (uud); neutron một quark up, hai quark downd: (udd); và rộng ra, nhiều loại hạt khác (hadron) được cấu tạo bằng các quark và phản-quark. Đây là một ý

---

[40] *Kragh*, 404.

[41] Ban nhạc rock, trong bài hát *Quark, Strangeness and Charm* (Quark, Tính lạ và Duyên).

tưởng đột phá xuống "đáy" sâu của vũ trụ. Nhưng trước khi mô hình quark ra đời đã có "khúc dạo đầu": Gell-Mann, và Ne'eman từ Israel độc lập nhau, năm 1962, nhận thấy rằng có thể xếp các hạt theo các mẫu dựa trên tính chất của nhóm SU(3)[42], nhóm ba hạt, tám hạt, mười hạt và hai mươi bảy hạt, theo số các toán tử (operator, transformation) của các phép biểu diễn[43] cần thiết để "quay" một thành viên này đến một thành viên kia của nhóm. Hai ông đã thành công trong việc lập nên bảng tám hạt và mười hạt, với tính chất tuần hoàn theo các thông số là những con số lượng tử (theo số lạ, strangeness; hoặc theo số isospin), và điện tích. Gell-Mann gọi các bảng tám hạt (octet) là "Bát chính đạo" (The Eightfold Path). Từ những bản tám hạt hay mười hạt đó (decuplet/ decimet) Gell-Mann cũng như Ne'eman nhận thấy còn thiếu hạt này hay hạt kia, với tính chất này, tính chất kia, và tiên đoán chúng. Quả nhiên, sau đó thực nghiệm đã tìm thấy chúng. *Bát chính đạo*, một từ mà Gell-Mann, một chuyên gia ngôn ngữ đã cố ý lấy từ thuyết nhà Phật (*chính kiến, chính tư duy, chính ngữ, chính nghiệp, chính mệnh, chính tinh tiến, chính niệm, chính định*), giống như bảng tuần hoàn mà Mendeleev từng tạo ra cho 92 nguyên tố một trăm năm trước. Nhưng ở đây, thế giới đã khác, tinh tế hơn. Bảng tuần hoàn Mendeleev dựa trên các thông số khối lượng và điện tích, trong khi Bát chính đạo có các thông số là những số lượng tử như độ lạ và isospin.

Gell-Mann, nổi tiếng là một thần đồng, với nhiều phát minh đột phá về hạt cơ bản, sắp xếp chúng lại hợp lí, có thể được mệnh danh là "vua

---

[42] Là nhóm các phép quay trong không gian ba chiều. Các phép quay này làm thành một nhóm (có những tính chất nhóm), nhóm Lie, lấy theo tên gọi của nhà toán học Na Uy Sophus Lie thế kỉ 19. Chúng có đặc tính *không* giao hoán (không-aben, non-abelian): AxB (áp dụng hai phép quay A và B lần lượt) không đồng nhất với phép quay BxA (B trước, A sau). Trong phép nhân các số thực thông thường, ta luôn có sự giao hoán $xy = yx$. Nhưng ở đây thì không. Xem Johnson, *Strange Beauty*, Chương 9.

[43] *Biểu diễn* (representation) của một nhóm G: là một phép áp (mapping) D của mỗi phần tử của G lên một tập hợp của các toán tử tuyến tính (linear operator) với những tính chất sau đây:
(1) $D(e) = 1$, trong đó: e là phần tử đồng nhất của G, và 1 là toán tử đồng nhất trong không gian mà các toán tử tuyến tính tác dụng.
(2) $D(g_1 g_2) = D(g_1)D(g_2)$ nói cách khác, phép nhân nhóm được áp lên phép nhân trong không gian tuyến tính của các toán tử tuyến tính.

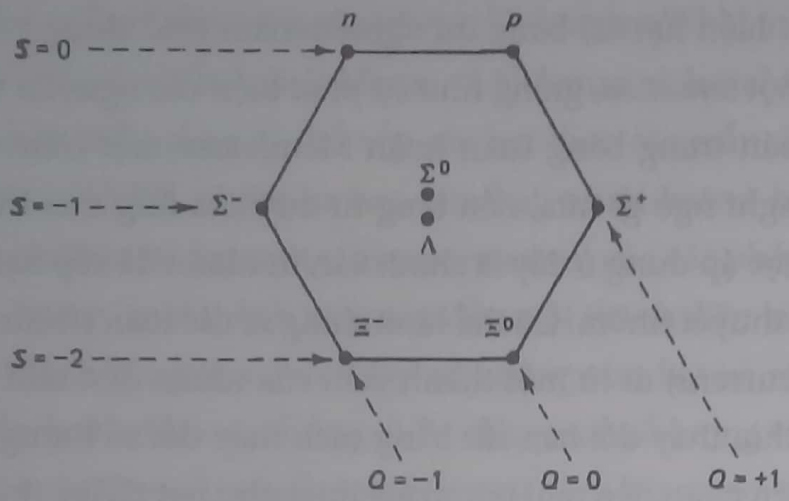
hạt". Sự phát hiện hạt Ω^- bằng thí nghiệm năm 1963 đúng với tiên đoán của ông, là một *sensation*, giống như sự phát hiện các nguyên tố còn thiếu được tiên đoán trong bảng tuần hoàn Mendeleev một trăm năm trước. Không còn nghi ngờ gì nữa, nền tảng tư duy của ông dựa trên lí thuyết nhóm Lie được áp dụng ở đây là chính xác, tự nhiên đã xếp hạt theo đúng các mẫu của thuyết nhóm. Có thể hình dung ra các toán tử cũng là những dòng chảy (current) đi từ một thành viên của nhóm đến một thành viên khác, đồng thời thay đổi bản sắc bằng cách thay đổi số lượng tử. Và mỗi dòng chảy liên quan đến một boson giả thiết như hạt tải lực (Johnson, 190-91)[44]. Bát chính đạo đã đem lại trật tự trong cánh rừng hạt hỗn độn. Sau *Bát chính đạo* và sự xác nhận thực nghiệm các viên gạch còn thiếu, Gell-Mann đã sướng lên đến "niết bàn" với giải thưởng Nobel năm 1969, trước cả sự xác nhận của hạt quark! Với sự xác nhận Bát chính đạo, Gell-Mann cảm thấy mình là con người mới, "a new me". Ông giống như một hiệp sĩ xông vào cánh rừng hạt hỗn độn để lập lại trật tự mặc dù chưa biết rõ lực mạnh chi phối các hạt là gì. Gell-Mann là người có rất nhiều đam mê, trong đó có đam mê quan sát chim. Trong tám ngàn loài chim thế giới ông đã quan sát được hơn nửa. Ông còn tham gia vào phong trào đấu tranh bảo vệ môi trường.

> "*Bát chính đạo*". *S* là độ lạ (strangeness), được Gell-Mann và Ne'eman đưa vào như một số lượng tử mới (quantum number) cho các hạt có tính chất lạ là phân rã chậm được tìm thấy từ trên trời cũng như trong các máy gia tốc. Như độ lạ, tính chất isospin[45] (ta không quan tâm ở đây) cũng là một số lượng tử, cả hai được bảo toàn trong các phản ứng hạt nhân gây ra bởi tương tác mạnh.

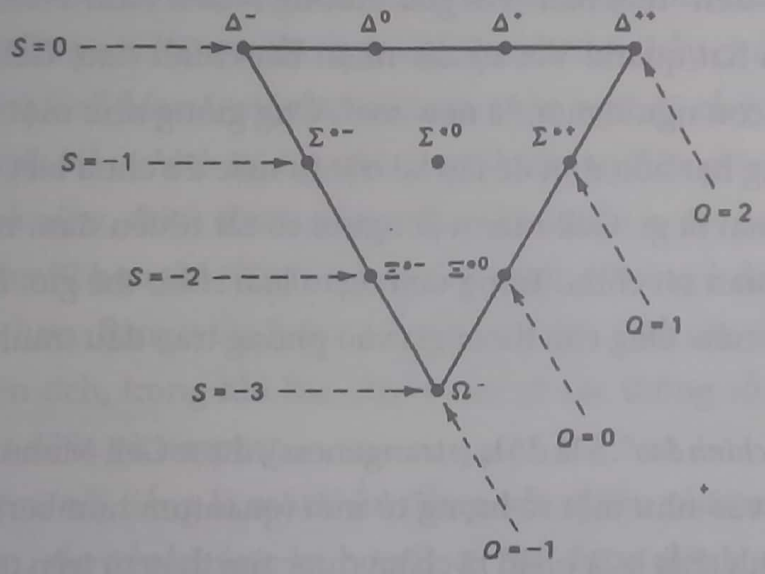
---

[44] Độc giả có thể tham khảo sự giải thích chi tiết trong Johnson, *Strange Beauty*, Chương 9.

[45] Là một số lượng tử được Heisenberg đưa ra năm 1932 để cắt nghĩa sự đối xứng (gần đúng) giữa neutron vừa tìm thấy và proton, xét về khối lượng. Isospin có kí hiệu là I. I (của proton) = 1/2x (số quark up - số quark down) = 1/2. Tương tự I (của neutron) = -1/2.



Bát chính đạo, hay bảng tuần hoàn 8 hạt (octet), của các hạt Baryon (Griffiths 2011, 35).



Bảng tuần hoàn 10 hạt Baryon (decuplet). Hạt Ω^- còn thiếu (Griffiths 2011, 36).

Nếu sử dụng mô hình quark, người ta có thể sắp các Bát chính đạo theo số lạ và số quark u chẳng hạn.

Số lạ. Sau hiện tượng hạt pion, có một số hạt được tìm thấy có tính chất đặc biệt, được gọi là *hạt lạ*, chúng xuất hiện luôn *cặp đôi* trong các va chạm hay phân rã, để lại dấu vết hình chữ V, chẳng hạn như hạt K^0 luôn đi đôi với hạt Σ^+, không bao giờ chỉ có một K^0 hay hai K^0. Chúng là sản phẩm của lực mạnh. Gell-Mann đặt tên tính chất này là tính lạ, hay số lạ (*strangeness*), có kí hiệu *s*, có trị số nguyên

âm lẫn dương; *s* là một số lượng tử và được bảo toàn bởi lực mạnh, điều giải thích tại sao các hạt lạ xuất hiện cặp đôi.[46] Các proton, neutron, pion được xem như các hạt thường, không lạ, nên có số lạ 0, nhưng +1 cho K^+ và K^0; -1 cho các Σ và Λ v.v. Trong các tương tác mạnh liên quan tới một hạt thường, nghĩa là số lạ 0, sự phát sinh một hạt lạ có số lạ +1 phải đi kèm theo một hạt có số lạ -1. Các hạt lạ sau này chính là những hạt chứa quark lạ.

Còn tại sao lại là *bộ ba* quark? Phép biểu diễn với ba toán tử, số nhỏ nhất, có tính chất là cơ bản, nghĩa là các phép biểu diễn với tám, mười toán tử, hay mười bảy, có thể được quy về nhóm biểu diễn với ba toán tử. Nghĩa là phép biểu diễn với ba toán tử là "viên gạch cơ bản" cho các phép biểu diễn lớn hơn. Điều này gợi lên rằng các hạt có thể được xây dựng bằng ba "quork" hay "quirk", với các điện tích lẻ là hệ quả, nhưng "khó coi" bởi điện tích lẻ chưa từng thấy trong thực nghiệm! Robert Serber là người đầu tiên đã gợi ý, sau khi đọc Bát chính đạo, và thúc giục Gell-Mann đi đến quyết định thừa nhận "bộ ba" này của thuyết nhóm là thành phần cơ bản. Bài mô hình quark của Gell-Mann sau đó được công bố đúng một ngày sau khi hạt Ω^- còn thiếu trong bảng tuần hoàn mười hạt được thực nghiệm tìm thấy ở trung tâm thí nghiệm Brookhaven. Những năm 1950 nhóm vật lí của Sakata ở Nhật Bản cũng đã từng đưa ra mô hình các hadron được cấu tạo bằng ba hạt proton, neutron và lambda, cho rằng các hạt này là cơ bản. Những điều tốt đều xuất hiện ba lần, như ngạn ngữ phương Tây nói. Kitô giáo cũng có "ba ngôi" (Trinity). Tôn giáo ở Ấn Độ cũng có "ba ngôi": Thần sáng tạo (Brahma), thần duy trì (Vishnu) và thần hủy diệt (Shiva). Chính con *số ba* lẻ này sẽ dẫn dắt các nhà vật lí đi sâu vào thế giới vi mô thêm nữa, thế giới của các "quark màu", và của *sắc động học* như bộ điều hành lớp hạt cuối cùng này.

Mô hình ba quark tuy được xem có cơ hội thành sự thật bởi các thí nghiệm sau đó cho thấy các proton và neutron còn ẩn chứa những hạt nhỏ hơn trong đó mà Feynman còn gọi là "parton" (bao gồm cả các hạt gluon, chất keo của lực mạnh để giữ quark). Nhưng không ai có thể "đánh bật"

---

[46] Xem *Griffiths* 2013, 115-17; và *Baggott* 2012, 58-59.

viên quark nào để nhìn mà tin cả. Không thấy không tin. Hơn nữa, do tính chất "bộ ba" nằm trong các hạt có điện tích số nguyên (+1 cho proton và 0 cho neutron), nên các quark phải có các điện tích bán nguyên (+2/3 cho quark *up* và -1/3 cho quark *down*), ta chỉ cần giải hai phương trình đơn giản với hai ẩn số là tìm ra điện tích bán nguyên của quark. Điều đó lại làm cho người ta càng nghi ngờ hơn nữa, bởi điện tích lẻ chưa bao giờ được quan sát. Số phận quark bị treo, và quark bị xem như là một thủ thuật toán học cho tiện ích. Bản thân Gell-Mann cũng bán tín bán nghi cực độ, nửa tin, bởi con đường "Bát chính đạo" đã quá đúng, và tiên đề ba quark chỉ là bước phát triển tiếp với thuyết nhóm SU(3) mà Gell-Mann và Ne'eman đã ứng dụng, bởi vẻ đẹp logic thu hút của nó. Ông như bị "tâm thần phân liệt." Một đồng nghiệp mô tả tâm trạng của Gell-Mann như sau: "Nếu quark không được tìm thấy, hãy nhớ rằng tôi không bao giờ bảo chúng sẽ được tìm thấy. Nếu chúng được tìm thấy, hãy nhớ rằng tôi là người nghĩ đến chúng đầu tiên." Chắc chắn các hạt quark nằm bên trong có những "trận cười" với những nhà vật lí hạt. Ngay những nhà vật lí tên tuổi đương thời như Feynman, và Victor Weisskopf, thầy của Gell-Mann, cũng không tin mô hình quark. Và nhóm vật lí của Đại học Kyoto, vốn chịu ảnh hưởng của "phép biện chứng duy vật" của Marx-Engels, đã xem quark là "chủ nghĩa duy tâm của tư sản".[47] Gell-Mann ngạc nhiên trước sự thật là người có lẽ duy nhất tin vào quark lại chính là Paul Dirac. Có lẽ bởi vì Dirac là người đã từng tiên đoán phản-hạt, một loại hạt "điên khùng" như hệ luận thuần túy của toán học, nhưng quả thật tồn tại, ngoài mọi sức tưởng tượng của con người.

Giải Nobel không trấn an được ông. Gell-Mann chờ đợi một tương lai đầy bất trắc: "Cuối cùng, có một viễn tượng thật sự hồi hộp của những sự ngạc nhiên, những sự việc hoàn toàn nằm ngoài trải nghiệm chúng ta, những điều mà ngôn ngữ lí thuyết hằng ngày của chúng ta không thích đáng để diễn tả... Sự căng thẳng đã tích tụ từ 15 năm qua; một cú sốc sẽ xảy ra khá nhanh." Nhưng chúng ta không lấy làm lạ khi biết rằng một thiên tài như Dirac sợ dư luận đến nỗi cũng không dám nói lên sự thật khám phá

---

[47] *Johnson*, 232.

của mình, ông từng cho rằng phản hạt của electron là *proton*, vì proton có điện tích nghịch với điện tích của electron. Năm 1931, trước sự chỉ trích của dư luận, ông mới nói đó là hạt "phản-electron", một bản sao của electron mang điện tích dương, còn lại giống hệt bản gốc electron. Năm 1932, Carl Andeson tìm thấy phản hạt electron, positron. Nhiều năm sau, khi được Gell-Mann hỏi tại sao ông không tiên đoán ngay phản hạt electron, ông trả lời rất thành thật: "Đó chỉ vì sự nhát gan."[48]

Sau giải Nobel 1969, tuy Gell-Mann vẫn tích cực trong ngành vật lí hạt, đóng góp thêm vào sự hình thành của thuyết sắc động học lượng tử cho lực mạnh đầu những năm 1970, nhưng sự lãnh đạo khoa học đang được chuyển dần sang thế hệ mới của những nhà vật lí hạt trẻ. Vai trò của Gell-Mann làm cho người ta nhớ lại một nhân vật lịch sử khác thời cổ đại. Giống như Moses đã làm những điều tốt đẹp cho dân tộc Israel, Gell-Mann đã đưa các nhà vật lí hạt ra khỏi sa mạc để đến thành phố Jericho, và từ đây những nhà vật lí trẻ sẽ tiếp tục sự nghiệp dẫn dắt chúng ta vào Miền Đất Hứa.[49]

Murray Gell-Mann (1929)
(Courtesy of Nobel Committee)

QUARK

"Three quarks for Muster Mark"

Gell-Mann lúc đầu gọi các quark của ông là quirk hay quork (kì la). Nhưng khi đọc lại tiểu thuyết *Finnegans Wake* của James Joyce (1882-1941) mà ông đã từng đọc trong thời niên thiếu, thì ông thấy một con hải âu say rượu gọi bia, thay vì nói "Ba chai bia (đơn vị Anh) cho ông Mark" (Three quarts for Mister Mark) thì nó lại nói chệch ra: "Ba quark cho Muster Mark" (Three quarks for Muster Mark). Quark, đọc là "quạc" trong tiếng Việt, còn là tiếng kêu của loài chim hải âu). Trời, sao nó phù hợp với ý tưởng *ba quark* của các proton và neutron của ông đến thế. Ông lấy ngay cái tên *quark*! Quark ở Đức lại có ý nghĩa là một món phô mai tươi như cottage cheese, đa dụng.

---

[48] *Baggott*, 2004, 45 hay *Gell-Mann*, 179.

[49] *Riordan*, 121.

THUYẾT YANG-MILLS

Vũ trụ được xây dựng trên một chương trình mà sự đối xứng sâu sắc của nó theo cách nào đó có mặt trong cấu trúc nội tâm của trí tuệ chúng ta.
Paul Valéry

Ý tưởng thứ hai của sự cứu rỗi là *thuyết Yang-Mills* được hai nhà vật lí C. N. Yang và Robert Mills phát minh năm 1954 tại phòng thí nghiệm Brookhaven. Đó là một công trình khai mở kỉ nguyên, là hạt giống của Yang được gieo trước cả sự khám phá vi phạm đối xứng gương của C. N. Yang và T. D. Lee. Yang và Mills muốn mở rộng điện động học QED để ứng dụng vào lực mạnh giữa các proton và neutron. "Điều gì sẽ xảy ra nếu chúng ta thay thế đối xứng chuẩn của electron bằng một đối xứng chuẩn khác?" QED là một thuyết trường điện động học cho electron và photon dựa trên nhóm SU(1)[50], tức đối xứng vòng tròn. Năm 1932, khi neutron được Chadwick tìm thấy, Heisenberg tin rằng hai hạt này chỉ là hai sự biểu hiện của cùng một hạt, gọi chung là nuclon (nucleon), bởi khối lượng của chúng gần bằng nhau.[51] Ông đưa vào khái niệm *isospin hạt nhân* (khác với spin thường), trong đó proton được phân cho một spin-trên (up, +1/2) và neutron một spin-dưới (down, -1/2), một cách tùy ý. Isospin là sự mở rộng khái niệm spin. Hai hạt proton và neutron có thể chuyển đổi qua lại bằng một phép "quay" spin của neutron trong không gian isospin, từ spin-dưới đến spin-trên. Vậy nên isospin là một (phép) đối xứng. Lực mạnh *sẽ không thay đổi* dưới tác động của phép (quay) đối xứng này. Sự khác nhau của proton và neutron là isospin, ngoài ra cả hai đều là một. Khái niệm này của Heisenberg là một "bước nhảy trực giác" dẫn tới những hậu quả "khôn lường", tuy isospin ban đầu chỉ là một tên gọi, một sản phẩm thuần túy của tri thức, một sự tương tự với spin của electron. Theo định lí Noether gợi ý, đại lượng nào sẽ được bảo toàn? Chính là isospin.

---

[50] SU(1) = nhóm unita các phép biến đổi một biến phức (complex variable).

[51] Khối lượng của proton là 938. 3 MeV/c^2, của neutron là 939. 6 MeV/c^2.

C. N. Yang và Robert L. Mills trong hội nghị vinh danh Yang khi ông về hưu, tại Đại học New York ở Stony Brook, 1999 (Nguồn: Huang 2007, 87)

Yang nhận ra rằng isospin là một loại *đối xứng chuẩn định xứ*, giống như đối xứng pha của hàm số sóng electron trong QED. Đối xứng isospin được bảo toàn đồng nghĩa với lực mạnh không phân biệt được chúng. Yang và Mills đi tìm lí thuyết trường bảo toàn isospin, giống như QED đã bảo toàn điện tích. Hai ông cần nhóm SU(2), hay đối xứng của hình cầu, là nhóm đặc biệt unita của các phép biến đổi hai biến phức, vì có hai đối tượng biến đổi lẫn nhau. Thuyết Yang-Mills cũng đúng cho mọi phép đối xứng. SU là viết tắt của *special unitary* [Tương tự, thuyết lực mạnh được dựa trên SU(3) một bậc cao hơn, nhóm này khác với SU(3) Bát chính đạo của Gell-Mann.]

Ngoài ra thuyết cũng cần đến *ba hạt* để chịu trách nhiệm cho truyền tải lực mạnh giữ proton và neutron trong nhân, giống như photon trong QED. Hai trong ba hạt này cần có điện tích để đáp ứng sự thay đổi điện tích trong tương tác proton-neutron và neutron-proton. Hai ông gọi hai hạt này là B^+ và B^-. Hạt thứ ba trung hòa, như photon, gọi là B^0, để đáp ứng tương tác proton-proton và neutron-neutron. Các hạt này không những tương tác với proton và neutron mà còn tương tác với nhau.[52] Ngày nay, các B được gọi là boson (véctơ), như các hạt *W*, *Z* trong thuyết lực điện-yếu, hay các gluon trong thuyết lực mạnh.

---

[52] *Baggott* 2012, 49-50.

Nhưng không may, các hạt tải lực nói trên, như một hệ quả của đối xứng chuẩn định xứ của thuyết, đều *không có khối lượng* (massless), như Pauli nhận ra. Các boson khi không có khối lượng thì tầm hoạt động của lực sẽ vô cực như lực điện-từ, trong khi các lực nguyên tử chỉ hoạt động ở khoảng cách cực ngắn. Lực yếu và lực mạnh sau này đều là những lực Yang-Mills. Ngày nay người ta biết các boson, trừ các boson của lực mạnh bị nhốt vào các hadron. Nhưng điều đó không phù hợp với thuyết lực điện-yếu có các boson nặng W, Z. Nếu các hạt B không khối lượng, thì thuyết Yang-Mills cũng không thể mô tả lực mạnh như mục tiêu của nó. Chỉ có photon là không có khối lượng. Mọi cố gắng ghép khối lượng vào đều thất bại, thuyết Yang-Mills không còn đối xứng. Pauli, người được mệnh danh là "tiên tri" và "kẻ phê phán không thương tiếc của Chúa", đã phê bình mạnh mẽ tính chất không có khối lượng của các boson này, trước sự sững sờ của Yang. Trong bài khảo cứu của mình, Yang và Mills viết: "Chúng tôi đi đến vấn đề khối lượng của lượng tử [B], nhưng chúng tôi không có một lời giải nào thỏa đáng." "Chúng tôi không biết làm sao để cho lí thuyết thích hợp với thực nghiệm", Yang nói. "Nhưng theo đánh giá của chúng tôi, vẻ đẹp của ý tưởng xứng đáng được chú ý."[53] Hai ông không tiến được thêm bước nào sau đó và chuyển sang lĩnh vực khác. Nhưng ý tưởng của Yang và Mills giống như viên kim cương, vẫn tiếp tục chiếu sáng với vẻ đẹp thu hút giới vật lí lí thuyết bất tận.

Yang tự thuật, mười năm sau công trình nghiên cứu với Mills, ông chẳng nhận được một lời mời nào để diễn thuyết về nó cả! Nhưng hai mươi năm sau, thuyết Yang-Mills mới sử dụng được và tạo nên những hệ quả "khôn lường" cho ngành vật lí hạt cơ bản. Viên kim cương đã tỏa sáng rực rỡ hơn bao giờ hết. C. N. Yang xứng đáng được trao tặng giải Nobel một lần nữa với R. Mills.

Khái niệm đối xứng chuẩn định xứ được mượn từ ý tưởng của Hermann Weyl năm 1918, năm Emmy Noether khám phá ra các định lí về đối xứng và bảo toàn. Weyl là học trò của David Hilbert, đã nỗ lực thống nhất lực hấp

---

[53] Crease vàMann, 195.

dẫn và thuyết điện từ, nhưng không thành công. Ý tưởng đối xứng này được Fritz London chỉnh sửa năm 1927, thành đối xứng pha trong thuyết điện từ. Lực điện-từ có đúng tính chất này: Nó bù trừ tất cả mọi sự thay đổi pha từ một vị trí bằng cách tạo ra những photon ảo, tức một trường điện từ tác động để bảo toàn điện tích.[54]

Ngày nay, sau Yang và Mills, người ta biết rằng đối xứng chuẩn định xứ quyết định tất cả các lực. Cả bốn lực của tự nhiên, lực hấp dẫn, lực điện-từ, lực yếu và lực mạnh đều dựa trên các phép đối xứng. Phép đối xứng chuẩn có tính chất "*không-aben*" (non-abelian). Nó không giống như đối xứng trong không-thời gian của Einstein. Nó dựa trên một nhóm không-aben[55] của các phép biến đổi. Các hạt B^+, B^- và B^0 ngày nay được gọi là "boson chuẩn". Khi nhóm đối xứng được xác định thì các boson chuẩn hoàn toàn được xác định.

Trong dịp vinh danh Einstein 70 tuổi năm 1949, nhà vật lí Eugene Wigner đã phát biểu: "Đây là điều tự nhiên khi chúng ta nỗ lực suy diễn các định luật của tự nhiên và kiểm tra tính đúng đắn của chúng bằng công cụ các định luật (tính) *bất biến*, hơn là suy diễn các định luật của tính bất biến từ điều mà chúng ta tin là các định luật của tự nhiên."[56]

---

[54] Crease và Mann, Chương 10 về *Đối xứng*.

[55] Nhóm (group) trong toán được định nghĩa như một tập hợp G, với một phép toán có tác dụng: cứ mỗi hai phần tử f và g của G (viết $f, g \in G$) nó tạo thành một phần tử mới fg (viết tượng trưng như dấu nhân cho tiện, hay bất cứ dấu nào khác) với những tính chất sau đây:
(1) Nếu $f, g \in G$, thì $fg \in G$.
(2) Nếu $f, g, h \in G$, thì $f(gh) = (fg)h$ (tính kết hợp).
(3) Có một phần tử đồng nhất $e \in G$ sao cho với bất cứ phần tử $f \in G$, thì $ef = fe = f$.
(4) Đối với mỗi phần tử $f \in G$ có một phần tử nghịch f^{-1} ($\in G$) sao cho $ff^{-1} = e$.
Nhóm G được gọi là *aben* khi $fg = gf$ cho mọi $f, g \in G$. Ngược lại, nếu $fg \neq gf$ thì nhóm được gọi là không-aben. Aben được lấy từ tên của nhà toán học Na Uy Niels Abel đầu thế kỉ 19.

[56] Ferris, 307.

CƠ CHẾ HIGGS

Sự diễn đạt cái huyền bí bằng cái huyền bí.

Wassily Kandinsky[57]

Các hạt cơ bản của vũ trụ tự chúng thiếu phẩm chất tồn tại trong không gian và thời gian.

Banesh Hoffmann[58]

Ý tưởng thứ ba là *cơ chế Higgs*, hay còn được gọi là cơ chế BEH theo tên ba nhà vật lí đã phát hiện đầu tiên: Brout, Englert và Higgs. Năm 1964 ba nhóm độc lập đề xuất các phương pháp chứng minh sự phá vỡ tự phát của một đối xứng định xứ *không* tạo ra các boson không khối lượng, đó là Robert Brout, François Englert; Peter Higgs; Gerald Guralnik, Carl Hagen và Tom Kibble. Tại sao người ta không đơn giản dùng tay đặt khối lượng vào cho chúng trong các phương trình ngay từ đầu? Điều đó đã được thử, nhưng tự nhiên không cho phép, các kết nối lượng tử chặt chẽ sẽ dẫn đến tính toán vô hạn, gọi là "không tái chuẩn hóa" (non-renormalizable) và không sử dụng được.

Ý tưởng của cơ chế Higgs có thể được mô tả tốt nhất bằng ý tưởng "phá vỡ đối xứng tự phát" (*spontaneous symmetry breaking*), một trong những ý tưởng đẹp nhất của thế kỉ 20, đầu tiên diễn ra trong ngành vật lí ngưng tụ, sau đó lan tỏa sang vật lí hạt. Ý tưởng này thế nào? Ngay sau Vụ nổ lớn (10^{-32} giây, nhiệt độ 10^{27} K), trường Higgs bằng không, vũ trụ là một "nồi xúp quark-gluon" nóng hơn mọi sức tưởng tượng của con người, tất cả các lực đều thống nhất với nhau thành một lực duy nhất, siêu lực; thế giới còn đối xứng. Nhưng khi vũ trụ nguội bớt do sự bành trướng, có một sự "nấc cụt", sự chuyển pha vũ trụ, trường Higgs xuất hiện tự phát (như hiện tượng ngưng tụ hay từ hóa), khiến cho các hạt có tương tác với nó trở thành *có*

---

[57] Danh họa Nga được xem là người tiên phong của trường phái hội họa thuần túy trừu tượng đầu thế kỉ 20. Ông sống ở nhiều nơi, lấy nhiều quốc tịch như Đức, Pháp.

[58] Nhà vật lí học Mĩ gốc Anh, cộng tác viên gần gũi của Einstein.

khối lượng, và *phá vỡ tự phát đối xứng*, các lực cơ bản, lực hấp dẫn, lực điện từ, lực mạnh và lực yếu, tách ra với những tính chất đặc thù của chúng. Từ khi có trường Higgs xuất hiện, các hạt như phải "bơi" trong đó và trở thành có khối lượng. Chỉ có photon của ánh sáng là không có khối lượng, đó là "hạt minh triết mang ánh sáng", và truyền lực điện từ. Các hạt khác của lực yếu và các hạt vật chất đều trở thành có khối lượng. Có thể so sánh, thuyết điện-yếu giống như tháp nghiêng *Pisa*, rất đối xứng, nhưng bị *nghiêng* về phía các boson nặng *W* và Z.

Lev Landau có lẽ là người đầu tiên đã có ý tưởng chuyển pha nhiệt động học (thermodynamic phase transition) khi có phá vỡ đối xứng trong vật lí ngưng tụ (condensed matter physics).[59] Sự chuyển pha có mối liên hệ với sự thay đổi đối xứng, các đối xứng tồn tại trên nhiệt độ chuyển pha sẽ mất đi dưới nhiệt độ đó. Các hạt *W* và Z của lực yếu cảm nhận cơ chế Higgs mạnh mẽ nên đã có khối lượng lớn, và lực yếu đã tách khỏi lực điện từ (với hạt tải lực photon không khối lượng), cũng vì thế làm cho lực yếu yếu hơn lực điện từ. Hiện tượng phá vỡ tự phát đối xứng giống như hiện tượng từ hoá tự phát của một thanh sắt khi nhiệt độ xuống đủ thấp, hoặc hiện tượng siêu dẫn. Trường Higgs đã "phân liệt nhân cách" của lực điện-yếu. Bởi vì hạt Higgs rất nặng, nó chỉ có thể xuất hiện, theo nguyên lí bất định Heisenberg cho cặp năng lượng và thời gian ($\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$), trong một thời gian ngắn ngủi.

Yoichiro Nambu là người, bằng cảm hứng và các ý tưởng lấy từ thuyết BCS (Bardeen- Cooper-Schrieffer) trong vật lí siêu dẫn, đã tự hỏi:

> Điều gì sẽ xảy ra nếu một loại vật liệu siêu dẫn chiếm cả vũ trụ và chúng ta sống trong đó? Vì chúng ta không thể quan sát chân không đích thực, trạng thái nền (ground state) của chất này thực tế sẽ trở thành chân không. Lúc đó ngay cả những hạt vốn không khối lượng trong chân không đích thực... sẽ nhận được khối lượng trong thế giới hiện thực (chúng ta đang sống).[60]

---

[59] Anderson, Chương "Y. Nambu and Broken Symmetry".

[60] Baggott 2012, 76.

Phá vỡ đối xứng, người ta sẽ nhận được các hạt có khối lượng, Nambu lí luận. Đó là một *khúc dạo đầu* của cơ chế Higgs. Nhưng trở ngại của chương trình Nambu là "định lí Goldstone" theo đó khi các trường bất biến chuẩn định xứ (đối với phép biến đổi Lorentz) có sự phá vỡ tự phát đối xứng, sẽ phải hiện hữu một loại boson mang spin 0 *không có khối lượng*. Phá vỡ đối xứng vẫn *chưa đủ*, phải có thêm một cơ chế nào đó để tạo khối lượng cho boson chuẩn mang spin 1[61]. Các boson spin 0 không khối lượng này được gọi là boson Goldstone hay Nambu-Goldstone.

Mặc dù phá vỡ tự phát đối xứng không được nhấn mạnh trong công trình BCS, nhưng sự nhận thức về hiện tượng này đã tạo ra một cuộc cách mạng trong vật lí hạt cơ bản, như Weinberg nhấn mạnh.[62]

Peter Higgs trong một hồi tưởng viết: "Nambu thật sự là một bứt phá quyết định."[63] Nhưng Nambu không đi tiếp, do những khó khăn của các boson không khối lượng.[64] Điều đó khiến ông về sau hối tiếc. Ông nói trong bài diễn thuyết nhận giải Nobel năm 2008: "Nghĩ lại tôi tiếc rằng tôi đã không nghiên cứu một cách chi tiết hơn nữa cơ chế tổng quát của sự tạo ra khối lượng cho trường chuẩn... Đáng lẽ tôi phải chú ý hơn cơ chế Higgs hiện tại."

Peter Higgs tự thuật sau khi bài nghiên cứu thứ hai của ông bị tạp chí *Physics Letters* từ chối.

"Tôi nổi cáu. Tôi tin rằng những gì tôi viết ra có thể có những hệ quả quan trọng cho ngành vật lí hạt. Sau đó, đồng nghiệp Squires của tôi... đã kể cho tôi rằng những nhà lí thuyết ở đó đã không hiểu được điều tôi đã làm. Bây giờ nghĩ lại, tôi thấy điều này không ngạc nhiên: vào năm 1964, bối cảnh lí thuyết hạt ở Âu châu bị thống trị bởi các nhà lí thuyết về ma trận-S. Lí thuyết trường lượng tử đã hết mốt và tôi lại nhanh chóng đưa ra sự mô tả cơ chế sinh ra khối lượng bằng lí thuyết trường cổ điển được tuyến tính hóa, được lượng tử hóa với sự giúp đỡ của các hệ thức de Broglie. Điều này có ý nghĩa gì đối với thế giới vật lí hạt mới ngoan ngoãn của các ma trận-S, của các mô hình bootstrap, của các cực Regge? "

(Nguyễn Tiến Bình *dịch*)

---

[61] Higgs 1997, 506.

[62] Weinberg 2008, 137.

[63] Higgs, 2.

[64] Định lí này sau đó còn được cũng cố thêm bởi Salam và Weinberg. Xem Higgs, 4.

Có thể thoát khỏi "định lí Goldstone" ngặt nghèo này không? Thực tế, các hadron không phải không có khối lượng, các tinh tú đâu phun ra các boson Nambu-Goldstone như phun ra photon. Người lên tiếng đầu tiên cho rằng có thể thoát khỏi boson Goldstone là Philip Anderson, trong một bài báo năm 1963[65], từ những kinh nghiệm của ngành vật lí ngưng tụ. Anderson chỉ ra rằng trong một chất siêu dẫn, kiểu (mode) Goldstone trở thành kiểu plasmon có khối lượng, do các tương tác điện từ của nó. Anderson chỉ dừng ở đó và tiên đoán "Sự khó khăn khối lượng zêrô của Goldstone là không nghiêm trọng", nhưng điều đó đã mở ra cho Peter Higgs và những người khác hướng vượt qua định lí không khối lượng Goldstone.[66]

Bài báo đầu tiên được đăng trên *Physics Letters* của CERN năm 1964 chứng minh các boson chuẩn có khối lượng là có thể, nhưng chưa đưa ra mô hình cụ thể với các boson nặng. Trong bài thứ hai Higgs đưa ra một mô hình trong đó các boson không khối lượng bị xoá bỏ bằng cách đưa vào một trường chuẩn "xơi" boson Nambu-Goldstone để "mập ra", nghĩa là có khối lượng.[67] Ông lại gửi bài đến tạp chí của CERN nhưng lần này bị từ chối! Sau đó với sự bổ sung một số chương, ông gửi bài cho *Physical Review Letters* của Mĩ. Theo yêu cầu của người đánh giá (sau này được biết là Nambu), ông viết thêm bình luận về bài của Englert và Brout, và ở đây ông xác nhận lần đầu tiên sự tồn tại cần thiết của một boson vô hướng (scalar) sau này được gọi là boson Higgs. Trong cái rủi có cái may.

Higgs rất ý thức sự đóng góp của Anderson năm 1963. Ông thừa nhận công lao của Anderson nhưng lại không đi xa hơn: "Anderson đáng lí ra đã làm hai việc cơ bản mà tôi đã làm. Ông sẽ vạch ra sự thiếu sót của định lí Goldstone, và xây dựng nên một mô hình tương đối tính đơn giản để chứng minh điều đó xảy ra. Tuy nhiên, khi tôi trình bày một tham luận về

---

[65] Anderson, "Plasmons, Gauge Invariance and Mass", *Phys. Rev.* 130 (1963).

[66] Higgs, 4.

[67] Carroll 2012, 223. Xem thêm Huang 2007, 189-191.

cơ chế gọi là Higgs, tôi bắt đầu bằng Anderson, người đã có suy nghĩ đúng, nhưng không ai hiểu ông ta."[68]

Bản thân Peter Higgs ban đầu không khỏi nghi ngờ ý tưởng của chính mình, giống như Gell-Mann. Năm 1964 ông viết cho một nghiên cứu sinh của ông: "Hè này tôi đã khám phá một điều hoàn toàn vô dụng", kí tên: "Peter Higgs". Bốn mươi năm sau, các nhà khoa học của trên 80 quốc gia đến trung tâm CERN để khởi động một đề án lớn mà một trong những mục tiêu chính là đi tìm hạt Higgs mang tên ông.

VỀ HIỆN TƯỢNG SIÊU DẪN

Chất siêu dẫn là các vật liệu mà khi nhiệt độ xuống đủ thấp, dòng các electron (tạo ra dòng điện) có thể chảy thông suốt không bị cản trở (Giống như hiện tượng siêu lỏng, *superfluidity*, do Pyotr Kapitsa khám phá năm 1937, rằng ở nhiệt độ 2. 17K, helium lỏng bất ngờ mất hết sức cản đối với dòng chảy). Lí thuyết đầu tiên của các chất siêu dẫn được đưa ra bởi các nhà vật lí Nga Vitaly Ginzburg và Lev Landau năm 1950. Họ gợi ý rằng một loại trường đặc biệt thấm suốt chất siêu dẫn gây ra hiện tượng siêu dẫn, mặc dù không chỉ rõ đó là trường gì. Bardeen, Cooper và Schrieffer (giải Nobel 1972) đã xác định trường ấy bằng lí thuyết BCS (viết tắt của tên ba ông), theo đó khi nhiệt độ xuống dưới trị số tới hạn, các electron của các nguyên tử của vật liệu siêu dẫn bỗng nhiên kết lại từng "cặp đôi hoàn hảo"- "cặp Cooper". Các electron bình thường đẩy nhau vì cùng có điện tích âm, nhưng nay chúng lại kết với nhau. Một electron nếu đứng lẻ sẽ liên tiếp bị va vào các nguyên tử xung quanh nó, tức gặp điện trở, nhưng trong một cặp đôi "hoàn hảo" thì chúng sẽ bảo vệ nhau, "trả đũa" ngay mỗi cú đẩy vào một electron bằng một cú kéo lại bù trừ lên electron kia.[69] Hệ quả là một cặp đôi như thế có thể trượt dài như trượt băng mà không gặp sức cản, làm vật liệu trở thành siêu dẫn! Thật huyền diệu. Cặp Cooper của hai electron vận hành như một boson, vì hai spin của chúng hoặc cộng nhau hoặc trừ nhau, nên cặp Cooper có spin 0, 1 hoặc -1, tức spin của boson. Siêu dẫn có tính chất rất đặc biệt là "kìm hãm" lực điện từ (đối xứng của lực điện từ bị phá vỡ), và đẩy từ trường ra (hiệu ứng Meissner-Ochsenfeld, có thể được sử dụng để xây loại xe điện chạy không ma sát trên đường ray). Tương tác giữa photon của lực điện từ và các cặp Cooper làm thay đổi bản chất của photon. Photon bị làm chậm lại, như thể chúng đi bằng chân trần qua một cánh đồng bùn: photon trở thành

[68] Carroll 2012, 226.

[69] Carrol 2012, 214 và Baggott 2012, 74.

có khối lượng! Vậy thì ở mô hình siêu dẫn, trong một trường thấm suốt không gian, đối xứng bị phá vỡ tự phát, boson không có khối lượng trở thành có khối lượng. Thông điệp ở đây là: một trường boson thấm suốt không gian có thể tạo khối lượng cho photon. Đó là nguồn cảm hứng của những nhà vật lí hạt cơ bản muốn đi tìm cơ chế tạo khối lượng cho các boson của các lực.[70] Thông số trật tự (order parameter) của Landau ở đây là "trường Higgs".

Wilczek đưa ra cách lí giải bằng thuyết trường: các photon là những nhiễu loạn chuyển động của các trường điện-từ. Trong một chất siêu dẫn, các electron phản ứng lại rất nghiêm ngặt với các trường điện-từ. Nên khi có sự nhiễu loạn điện từ của photon đến, thì các electron của chất siêu dẫn, để tái lập cân bằng một cách chặt chẽ, phải tạo ra một sức kéo lại tác dụng lên chuyển động của các trường (của photon). Vậy nên, thay vì chuyển động với vận tốc thông thường của ánh sáng, các photon bên trong vật siêu dẫn chuyển động chậm hơn, như thể chúng đã có quán tính, nghĩa là có khối lượng. Trong các phương trình, người ta sẽ thấy các photon bị chậm lại bên trong một chất siêu dẫn tuân thủ cùng các phương trình như thể chúng có khối lượng thật sự.[71]

Weinberg đã diễn tả sinh động về phá vỡ đối xứng: "Chúng ta (giống như những sinh vật trong thanh nam châm), gần đây biết rằng một đối xứng đã bị phá vỡ trong vũ trụ *chúng ta*[72]. Đó là đối xứng giữa các lực yếu và điện từ, sự phá vỡ đã được chứng minh, chẳng hạn, bởi những điểm không giống nhau giữa photon không khối lượng và các hạt rất nặng W và Z." Ông cho rằng sự bất đối xứng trong trường hợp thanh nam châm được thể hiện qua sự định hướng bắc-nam của từ trường của nó ai cũng thấy ngay. Còn sự bất đối xứng trong Mô hình Chuẩn thì có tính chất huyền bí. Đó là trách nhiệm của trường Higgs. Leon Lederman thì viết một cách thi vị về tác động của cơ chế Higgs: "Như vậy, trước Higgs, chỉ có đối xứng và sự buồn tẻ; sau Higgs, có sự đa phức và phấn kích. Tiếp đến nếu nhìn lên bầu trời đêm, bạn sẽ ý thức rằng tất cả không gian kia tràn đầy những ảnh

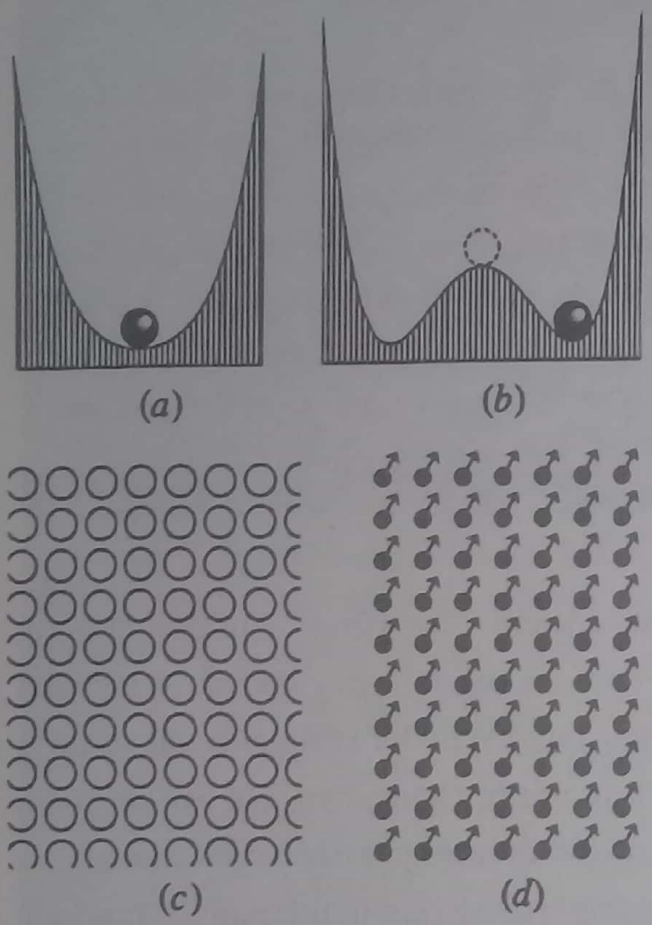
---

[70] Mee, Chương 7, *The Mystery of the Secret Symmetry*. Xem thêm bài của GS. Phạm Xuân Yêm trong Kỉ yếu.

[71] Wilczek 2008, 95.

[72] Có thể hình dung thêm một sự "phá vỡ đối xứng" của thế giới phương Đông: Giả thiết có thế giới linh hồn. Thế giới này "đối xứng" bởi các linh hồn bay bổng, không khối lượng, do đó không bị ràng buộc vào một khoảng không gian nào. Sự đầu thai của mỗi linh hồn xuống thế gian là một hiện tượng "phá vỡ đối xứng tự phát": linh hồn đó đã có khối lượng và bị ràng buộc vào thế gian, có sức ì, giống như các hạt W, Z.

hưởng huyền bí của Higgs, đó là nguồn gốc, theo lí thuyết này, cho sự đa dạng phức tạp của vũ trụ mà chúng ta biết và yêu thích."[73]



Đối xứng và phá vỡ tự phát đối xứng. Một hệ thống đối xứng các phương trình có thể có một nghiệm số đối xứng, lúc đó bền (a). Hoặc nó có một nghiệm số bất đối xứng (b). Nếu một trường có một nghiệm số đối xứng, thế giới mà nó mô tả sẽ đối xứng (c). Nếu nghiệm số là bất đối xứng, tất cả hiện tượng trong thế giới cũng sẽ bất đối xứng (d) ('t Hooft, 71).

Đối xứng ẩn. Sự phá vỡ đối xứng của cơ chế Higgs còn được thể hiện một cách khác. Đó là các phương trình vật lí tuy tuân theo các phép đối xứng, nhưng các trạng thái vật lí, thể hiện qua các nghiệm số của các phương trình, thì lại *không*. Khi đối xứng bị phá vỡ (bên trong), các nghiệm số không còn tuân theo các đối xứng của phương trình nữa! Do đó đôi khi người ta còn gọi là *đối xứng ẩn* (hidden symmetries). Các phương trình mô tả các hạt quark u và d, chẳng hạn, là đối xứng đối với các hạt, nhưng điều đó không bảo đảm các nghiệm số nhất thiết phải đối xứng. Phương trình có hai nghiệm, mỗi nghiệm tự nó không đối xứng, nhưng sự đối xứng được thể hiện trong tổng thể của hai hay tất cả các nghiệm. Nghiệm thứ nhất sẽ

[73] Lederman &Teresi, 374.

cho khối lượng quark u lớn hơn quark d, nhưng nghiệm thứ hai cho khối lượng quark u nhỏ hơn quark d, với cùng một lượng khác biệt.[74]Tự nhiên sẽ chọn một trong hai nghiệm trong thực tế. Sự đối xứng đã bị "phá vỡ" thành nhiều nghiệm số khác nhau, điều này đã được quan sát thấy trong các phòng thí nghiệm, và rất thú vị.[75]

Theo Mô hình Chuẩn, chân không không phải là không có gì, mà tràn đầy trường Higgs, có mức năng lượng thấp nhất không bằng không. Các quanta (gói năng lượng) của trường này chính là các boson Higgs có spin 0 ở khắp nơi. Frank Wilczek diễn tả trong *The Lightness of Being*: "Không gian cũng không phải như cái chúng ta thấy. Cái xuất hiện như khoảng trống trước mắt được trí tuệ chúng ta khám phá là một môi trường phức tạp đầy rẫy những hoạt động tự phát."[76]

Trường Higgs làm người ta nhớ lại chất ether tồn tại từ lâu trong vũ trụ, đặc biệt cuối thế kỉ 19, như một môi trường vô hình (invisible medium) để truyền tải sóng điện từ, ánh sáng, và sau thuyết tương đối hẹp của Einstein năm 1905 nó đã không còn hiệu lực. Nhưng trường Higgs bao trùm không gian không liên quan đến việc truyền ánh sáng, không ảnh hưởng tới tốc độ hay chuyển động. Người ta chỉ có thể gỡ bỏ trường Higgs bằng cách đun nóng vũ trụ lên mức 10^{15} độ, điều con người không thể làm được trong lúc này.

---

[74] Weinberg 1993, 194-95.

[75] Thêm một ví dụ về các quỹ đạo elip của hành tinh trong thái dương hệ. Các phương trình chi phối trường lực hấp dẫn của mặt trời, và các chuyển động của thiên thể trong trường này, tuân theo đối xứng quay; không có gì để phân biệt hướng này với hướng khác, các hướng đều bình đẳng với nhau. Một chuyển động tròn theo cách nghĩ của Plato sẽ tuân theo đối xứng này, nhưng các quỹ đạo elip thực tế của các hành tinh thì không: trục dài của elip chỉ ra một hướng định rõ trong không gian. Xem Weinberg 2011.

[76] Wilczek, 1.

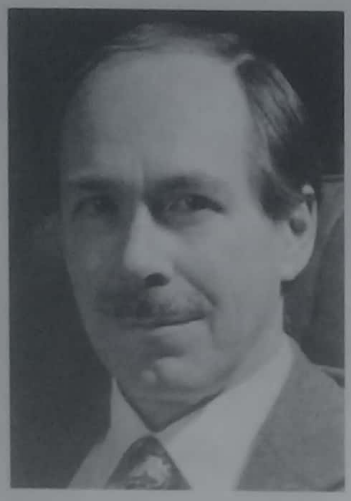
BỨT PHÁ

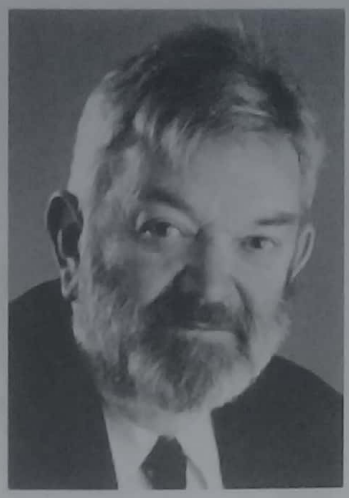
Sự thừa nhận sự thật được thực nghiệm như một mặt của chân lí là một chủ đề sâu xa, và là động cơ chính yếu đã làm chuyển động nền văn minh chúng ta từ thời Phục hưng.

Jacob Bronowski

Mười ba năm sau thuyết Yang-Mills, bốn năm sau cơ chế Higgs hay BEH, Glashow, Salam và Weinberg thiết kế sự thống nhất hai lực điện từ và lực yếu (1967) bằng thuyết Yang-Mills và dựa trên cơ chế hạt Higgs với các boson của lực yếu *W, Z có khối lượng*, thoát khỏi cái bẫy "Goldstone-Nambu". Cần thêm bốn năm nữa khi người sinh viên mới 25 tuổi (!) tài cao Gerardus 't Hooft của xứ sở hoa tulip chứng minh chặt chẽ bằng toán học (1971) rằng một lớp rộng các thuyết chuẩn (không-aben, không giao hoán) có thể "tái chuẩn hóa", trong đó có thuyết điện-yếu của Weinberg, tức không bị cản trở bởi các đại lượng vô hạn (infinities) vô nghĩa về vật lí, thì thuyết này mới được sử dụng rộng rãi. Tái chuẩn hóa từng là đề tài của những năm 1950, xuất hiện trong thuyết QED, đã được khắc phục cho thuyết này. Nhưng đối với thuyết lực điện-yếu thì các cha đẻ của nó Glahshow, Salam và Weinberg đều bó tay, mặc dù họ tin tưởng vào tính tái chuẩn hóa của thuyết.

Nhưng nụ hôn của 't Hooft đã "biến con ếch bị lời nguyền của Weinberg thành vị hoàng tử làm say mê lòng người" (Sidney Coleman). Tức thì bài báo của Weinberg năm 1967 được trích dẫn như "thác lũ" sau nhiều năm không được quan tâm. Có thể hiểu được, vì ba thập niên qua là thời kì thuyết trường lượng tử bị "khai tử" trên toàn thế giới. Đến năm 1979 số trích dẫn lên tới kỉ lục: 8.000 lần! Giới vật lí trở lại *thuyết trường lượng tử*. Nếu năm 1961 Chew đã so sánh thuyết trường lượng tử (QFT, Quantum field theory), như một "người lính già được số mệnh quyết định không chết liền, nhưng dần dần biến mất" thì mỉa mai thay, đúng 10 năm sau, người lính già ấy sống lại như một "thần đèn" đầy quyền năng, và thuyết ma trận-S (hay bootstrap) dần dần biến mất như một làn khói. Không có QFT, khó lòng có một Mô hình Chuẩn hôm nay.





Gerardus 't Hooft (trái) cùng với thầy của mình Martinus J. G. Veltman (Courtesy of Nobel Committee). Giải Nobel Vật lí 1999 được trao cho hai ông *"vì đã làm sáng tỏ cấu trúc lượng tử của tương tác điện-yếu trong vật lí"*.

Sự tồn tại của các tương tác điện-yếu được kiểm tra thực nghiệm qua hai giai đoạn, giai đoạn đầu bằng sự khám phá các dòng trung hòa của Z năm 1973 tại CERN ở Âu châu (với máy dò đặc biệt Gargamelle) và bị giới vật lí hạt rất nghi ngờ, trước khi khám phá này được tái xác nhận tại Fermilab ở Mĩ năm sau. Giai đoạn hai bằng sự khám phá của các boson chuẩn *W* và *Z* năm 1983 tại CERN do công của nhà vật lí Ý Carlo Rubbia và nhà thiết kế Hà Lan Simon van der Meer. *W* có nghĩa là *weak*, yếu. Với kí hiệu Z, Weinberg muốn rằng đó là sự chấm hết các boson của lực điện-yếu. Sự tồn tại của dòng trung hòa, của *W* và *Z* là những thành tựu tuyệt vời của thuyết điện-yếu, và lần lượt được thực nghiệm xác nhận chính xác.

Sự khám phá các hạt *W*, *Z* tại CERN là một câu chuyện li kì. Trong một bài hồi tưởng, GS. Pierre Darriulat, người chủ trì một cỗ máy trong khám phá các hạt *W*, *Z*, đã viết về Rubbia: "Không nghi ngờ gì Carlo là vua của vương quốc proton-phản proton và được công nhận như thế bởi tất cả chúng tôi. Công trạng của Rubbia là đã thúc đẩy các ý tưởng của ông về một máy gia tốc proton-phản proton với một sự quyết tâm không mệt mỏi trong một không khí đối nghịch. Thực thế, ông thúc đẩy không những với một quyết tâm mà còn với một tầm nhìn sáng sủa về những gì mà các đề nghị của ông sẽ mang lại, và với một sự hiểu biết sâu sắc về các vấn đề giữa vật lí và máy móc đang bị gặp khó khăn."

Tháng Giêng năm 1983, Rubbia công bố kết quả nghiên cứu của mình tại một cuộc hội thảo ở Roma, trong một trạng thái thần kinh căng thẳng khác thường: *"Chúng trông như các hạt W, chúng ngửi như các hạt W, chúng phải là các hạt W."*[77]

Carlo Rubbia

Simon van der Meer

Giải vật lí 1984 được trao cho Carlo Rubbia và Simon van der Meer *"vì các đóng góp cho dự án lớn đưa đến khám phá các hạt trường W và Z, hạt truyền tải của tương tác yếu"* (Courtesy of Nobel Committee).

Pierre Darriulat ở tuổi 45 (Ảnh: CERN), lúc đảm nhận vị trí phát ngôn viên cỗ máy UA2 của CERN trong cuộc khám phá các hạt boson lực *W, Z* chung với Carlo Rubbia. Về công nghệ, CERN bắt đầu vượt qua các phòng thí nghiệm tên tuổi của Hoa Kì đã từng ngự trị trên vũ đài vật lí hạt mấy thập niên và đã tìm ra các hạt cơ bản. Tờ *New York Times* có bài xã luận tháng 7 năm 1983 với tiêu đề giật tít: "Châu Âu 3 hạt, Hoa Kì ngay cả Z-Zero cũng không" (Châu Âu được cả 3 hạt W^+, W^-, Z^0, còn Hoa Kì không được ngay cả Z^0). Tờ *Times* viết "Tin không lành là người Âu châu đã dẫn đầu trong cuộc chạy đua để khám phá các viên gạch cơ bản cuối cùng của vật chất." Không những các hạt W, Z, mà các viên keo gluon của lực mạnh cũng được tìm thấy tại một máy gia tốc của Đức. Vậy là tất cả các boson lực về tay người Âu châu, một sự "báo thù", như một cách nói giật tít (Trong Sample, 101). Từ hơn mười ba năm qua GS. Pierre Darriulat giảng dạy và tạo được một nhóm nghiên cứu tại Hà Nội (*Nguồn ảnh*: Prix André Lagarrigue).

[77] Baggott 2012, 152.

Cuộc họp báo lịch sử năm 1983 công bố đã tìm thấy các boson lực yếu W và Z.
Bên trái từ ngoài vào: Rubbia rồi đến Van der Meer. Ngoài cùng bên phải: Darriulat.

Không những lực yếu, mà cả lực mạnh, còn gọi là *sắc động học lượng tử* QCD, lực điều hành các quark, cũng dựa trên thuyết Yang-Mills. Lực mạnh có các boson gluon không khối lượng, nhưng có cùng định mệnh là bị nhốt vào các "trại giam hồng ngoại" để quản lí các quark. *Quark - gluon* - và *sắc động học* là một thành tựu cột mốc trong Mô hình Chuẩn mà nếu không có lớp này, không thể hiểu được kiến trúc tinh tế của tạo hóa muốn thách đố con người. Đó là "lớp đáy" của chân lí sâu thẳm. "Sắc là chìa khóa"[78], như câu nói của danh họa Kandinsky. Đúng như thế. Phải tới lớp này mới hiểu được kiến trúc của tạo hóa. Sắc (màu) được đề xuất bởi O. Greenberg, Nambu (1964), rồi Gell-Mann và Fritzsch (1973) để mô hình quark không mâu thuẫn với nguyên lí Pauli. Tự nhiên đã tỏ ra không đơn giản, và giàu tưởng tượng hơn con người nhiều. Einstein đôi khi cũng nghĩ, Thượng Đế có thể "thâm hiểm" lắm. Nhưng con người đã lần được những bước đi khúc khuỷu của Ngài.

[78] Kandinsky, trong Düchting.

"CUỘC CÁCH MẠNG THÁNG MƯỜI MỘT" và TRIẾT HỌC CHÍNH THỐNG MỚI

Giờ hãy xem trí tuệ kia, nó tìm kiếm, và làm cho
Tất cả bí ẩn che giấu của tự nhiên trở nên sáng sủa,
Phơi bày ra như tù nhân phủ phục của bóng đêm.

Boethius[79]

Những thập niên 1950, 1960 và 1970 là thời kì *sturm und drang* của vật lí hạt cơ bản, dông bão và thôi thúc, và cũng của diễn đàn chính trị thế giới, với chiến tranh, bạo loạn. Trong khi Hoa Kì lâm vào cuộc chiến u ám tại chiến trường Việt Nam, thì cộng đồng vật lí hạt lâm vào một cuộc chiến khác, không phải chống lại nhau, mà chống một "kẻ thù" chung: sự "vô minh"[80]. Năm 1964, năm khai sinh mô hình quark và cơ chế Higgs, cũng là năm nhóm Beatles gây bão tố tại Hoa Kì. Ba năm sau, 1967, sự thống nhất hai lực điện từ và lực yếu hình thành nhưng phải chờ thực nghiệm xác nhận. Qua những năm 1970, Mô hình Chuẩn hình thành, sau "cuộc cách mạng tháng Mười một"[81], một cách đầy tự tin; vật lí hạt bước sang trang, ra khỏi cuộc khủng hoảng, cũng vào lúc mây mù chính trị thế giới tan biến. Một chuỗi thí nghiệm tán xạ electron từ năm 1967 đến 1973 bởi sự hợp tác các nhà khoa học của MIT và Trung tâm Gia tốc tuyến tính Stanford (SLAC) cung cấp chứng cứ trực tiếp rằng proton có cấu trúc bên trong mà quark là các ứng viên. Khái niệm quark từ vương quốc platonic bước gần vào *thực thể vật lí*. Các nhà lãnh đạo nhóm Jerome Friedman (từng thăm Việt Nam tại các Hội thảo gặp gỡ Việt Nam), Henry Kendall của MIT và Richard Taylor của SLAC được trao giải Nobel năm 1990.

Với sự xuất hiện của thuyết sắc động học lượng tử đầu những năm 1970, ý tưởng quark có sức thuyết phục hơn. Sự bứt phá diễn ra vào lúc David Gross và Frank Wilczek tại Princeton và David Politzer tại Đại học Harvard độc lập với nhau chứng minh rằng, một số thuyết trường lượng

---

[79] Nhà triết học cổ đại cuối cùng trước khi xã hội phương Tây bước vào "thời kì đen tối".

[80] Schumm, 283.

[81] "November Revolution".

tử như sắc động học lượng tử của lực mạnh, có tính chất lạ, nói rằng lực tác dụng của các thuyết này sẽ giảm đi khi các hạt tiến gần nhau, và khi khoảng cách đủ nhỏ, lực không còn tác dụng nữa (hiện tượng *tự do tiệm cận*). Như vậy, trong trường hợp lực mạnh, lực này giữa các quark và gluon sẽ giảm với khoảng cách ngắn, tăng với khoảng cách dài, và có lẽ sẽ tăng mạnh đến nỗi không cho phép các quark và gluon đi xa nhau quá. Điều này giải thích được tại sao người ta không thể quan sát được quark và gluon tự do, cũng như tại sao sự vận động của các quark trong các neuclon giống như khi chúng tự do, điều mà người ta đã quan sát trước đó.[82]

Các kháng cự cuối cùng chống lại mô hình quark thực sự chấm dứt vĩnh viễn sau "cuộc cách mạng tháng Mười một" năm 1974 khi tại SLAC dưới sự lãnh đạo của Burton Richter, và Phòng thí nghiệm quốc gia Brookhaven, dưới sự lãnh đạo của Samuel Ting, viên quark *duyên* mà Glashow và Bjorken tiên đoán năm 1964 được tìm thấy gián tiếp qua một meson chứa quark duyên và phản-quark duyên, được gọi là hạt charmonium và được đặt tên là J/ψ. Nhóm của Richter đặt tên meson duyên là ψ (psi, kí tự Hi Lạp), trong khi nhóm của Ting gọi nó là *J*, giống chữ (丁) tên tiếng Hoa của Ting (tiếng Việt: Đinh). Kết hợp lại, người ta gọi nó với cái tên đôi làJ/ψ. Với quark duyên, bộ tứ của hai thế hệ đầu quark và lepton của Mô hình Chuẩn được hoàn tất đối xứng đẹp, cho thấy thêm, quark và lepton có quan hệ mật thiết với nhau. Hơn nữa, meson này trung hòa và nặng (khối lượng tĩnh 3,0969 GeV/c^2, khối lượng của quark khoảng 1,5 GeV/c^2) gấp ba lần trọng lượng của một proton (meson theo nghĩa ban đầu có nghĩa là nặng trung bình). Sự tồn tại của quark duyên này cũng được đòi hỏi bởi thuyết thống nhất điện-yếu của Glashow, Salam và Weinberg. Chính boson trung hòa Z^0 của thuyết này mà dòng trung hòa (neutral current) của nó được phát hiện một năm trước đã gây ra sự trao đổi tính lạ (strangeness)[83]. Thuyết lực

---

[82] Weinberg 1994, 182-83.

[83] Xem giải thích chi tiết trong Schumm, 105-114. Người ta lúc đầu lầm tưởng rằng một sự tán xạ của một muon neutrino với một quark down thông qua trao đổi một boson trung hòa Z^0 của lực yếu sẽ cho ra quark s, điều lại không tìm thấy trong thực nghiệm. Năm 1970, cơ chế GIM (Glashow-Iliopoulos-Maiani) giải thích rằng điều đó không xảy

mạnh QCD cũng tiên đoán (Politzer và Tom Appelquist) ở năng lượng cao, lực mạnh sẽ giảm, và cặp quark duyên này ít hút nhau, nên phân rã rất lâu. Điều này cũng được xác nhận tuyệt vời, tuổi thọ của J/ψ (10^{-20}s), gấp 1.000 lần các hạt khác, chẳng hạn các hạt hadron tiêu biểu (10^{-23}s)[84]. Vậy nên việc khám phá J/ψ củng cố thêm lòng tin vào lực yếu và lực mạnh. Vì thế nó được gọi là một cuộc cách mạng. Hai năm sau, giải Nobel đã được trao cho Richter và Ting.

Burton Richter

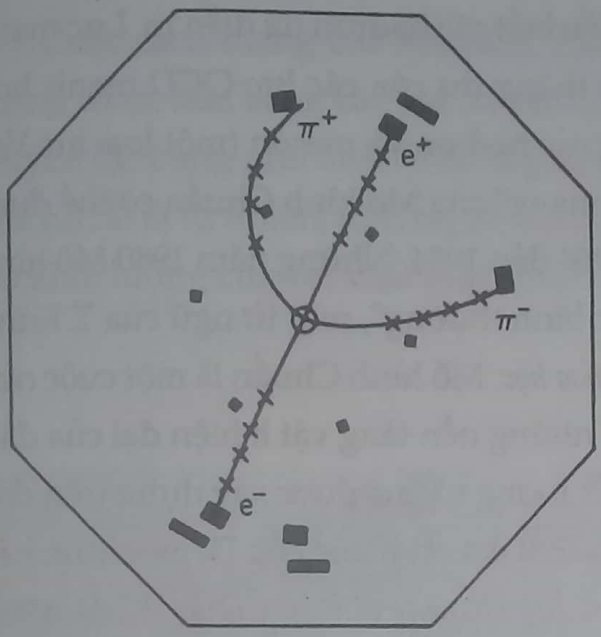
Samuel Ting

Giải Nobel Vật lí 1976 được trao cho Burton Richter và Samuel Ting đã làm "cuộc Cách mạng tháng Mười một", *"vì công trình khai phá của họ trong việc khám phá một hạt cơ bản nặng loại mới"*.

---

ra nếu như (tiên đoán) có một quark duyên tồn tại, người bạn đồng hành của quark lạ trong thế hệ thứ hai, và quark d sẽ phân rã thành quark duyên, chứ không phải quark lạ.

[84] Griffiths 2011, 44 và Close 2007, 131-132 và Martin, 127.



Sự phân rã của một hạt (Ψ') thành hạt J/Ψ (được tái tạo bằng computer máy dò Mark I của trung tâm SLAC năm 1974). Ψ' là một trạng thái được kích thích của J/Ψ. Ψ' phân rã thành hai pion π^+ và π^- (hai vòng cung) và một J/Ψ; hạt này lại phân rã thành 1 electron (e^-) và positron (e^+) (đường thẳng). Ψ' được hình thành từ sự tiêu hủy của 1 electron và 1 positron va chạm nhau trong trung tâm của máy dò. Ảnh giống như kí tự psi Ψ của Hi Lạp, một sự trùng hợp đáng ngạc nhiên. Hạt J/Ψ nay đã tự viết tên mình.

Từ đó, Mô hình Chuẩn được xây dựng trên nền tảng vững chắc: mô hình quark, cơ chế Higgs, thuyết lực điện-yếu thống nhất, thuyết lực mạnh QCD, và hai thế hệ hương vị quark và lepton. Hai lực, lực mạnh và lực điện-yếu đều có một nguồn gốc chung: thuyết Yang-Mills. Hạt Higgs chưa tìm ra, nhưng sự giả định của nó giúp cho Mô hình Chuẩn hoạt động chính xác, phù hợp hoàn hảo với thực nghiệm. Sắp tới sẽ có một loạt giải Nobel, đặc biệt cho thuyết điện-yếu thống nhất, của những công trình dựa trên giả định đó. Mô hình Chuẩn trở thành "triết học chính thống mới" của vật lí hạt, như Sheldon Glashow viết trên *The New York Times Magazine* tháng 7 năm 1976, chấm dứt tình trạng "sứ quân", và như thực tế chứng minh, sẵn sàng đương đầu với mọi thử thách của chặng đường sắp tới. Những năm 1970 là thời gian ngây ngất của vật lí hạt cơ bản, hay còn được gọi là vật lí năng lượng cao, bởi tất cả các thí nghiệm trong các máy gia tốc đều sử dụng năng lượng cao mới khám phá ra các hạt cần được kiểm chứng. Những hoạt động cho 10 năm tới nhằm làm rõ đường nét của Mô hình Chuẩn theo một đường thẳng như chờ đợi. Cấu trúc nguyên tử xem như hoàn toàn được giải mã.

Nếu đầu năm 1964 các hadron còn được tin rộng rãi là những hạt cơ bản, tương tác mạnh với nhau, với kích thước khoảng 10^{-15}, thì cuối 1970, hadron được xem là những hạt hỗn hợp của các quark u và quark d, kết nối lại bằng lực mạnh của các gluon (meson hỗn hợp của quark và phản quark). Đó là

một sự thay đổi trọng đại trong sự hiểu biết các hadron đã diễn ra. Lực mạnh của năm 1964 được hiểu ra là phần thặng dư của các lực QCD mạnh hơn nhiều giữa các quark và gluon trong các hadron và meson (một loại lực Van der Waals của hadron)[85]. Cuộc "cách mạng" của Mô hình Chuẩn có thể được xem đã diễn ra đúng hai thập kỉ từ 1964 đến 1984. Những năm 1980 Mô hình Chuẩn bước vào giai đoạn "khoa học bình thường", một từ ngữ của T. Kuhn trong *Cấu trúc của các cuộc cách mạng khoa học*. Mô hình Chuẩn là một cuộc *cách mạng tiến hóa*, vì nó không phủ nhận những nền tảng vật lí hiện đại của đầu thế kỉ 20 là thuyết tương đối và thuyết lượng tử, mà được xây dựng trên đó.

Mô hình Chuẩn đã trả lời câu hỏi 2.500 năm trước của Democritus: các nguyên tử chính là các hạt quark và lepton tạo nên vật chất. Khái niệm *khối lượng* của Newton trong *Principia* ba thế kỉ rưỡi trước giờ đây đã được giải mã, tiếp theo sau sự giải mã khái niệm lực hấp dẫn bởi Einstein đầu thế kỉ 20 với thuyết tương đối rộng. Tài khoản nợ của Newton giờ đây đã được thanh lí. Hơn thế nữa, quan niệm nguyên tử là những thực thể *cơ giới* (mechanical), như những quả bóng da, kéo dài từ Democritus cho đến thời Maxwell, Boltzmann của cuối thế kỉ 19, được thay thế bằng quan niệm các hạt cơ bản là những thực thể *lượng tử* với bản thể nhị nguyên vừa sóng vừa hạt và tuân thủ các định luật lượng tử.

Giữa thế kỉ 20, nhà vật lí học Mĩ Richard Feynman đánh giá tầm quan trọng của *giả thuyết nguyên tử* trong bộ sách *The Feynman Lectures on Phycics* như sau:

> Nếu, trong một đại hoạ nào đó của nhân loại, tất cả tri thức khoa học bị phá huỷ, và chỉ còn một câu duy nhất được truyền tụng cho đời sau của con người, thì nội dung nào sẽ chứa đựng nhiều thông tin nhất với số chữ ít nhất? Tôi tin đó là *giả thuyết nguyên tử*... rằng *mọi vật được làm bằng các nguyên tử - những hạt nhỏ chuyển động xung quanh không ngừng, hút lẫn nhau nếu cách xa nhau một khoảng cách nhỏ, nhưng đẩy nhau nếu bị dồn nén gần nhau* (1963).[86]

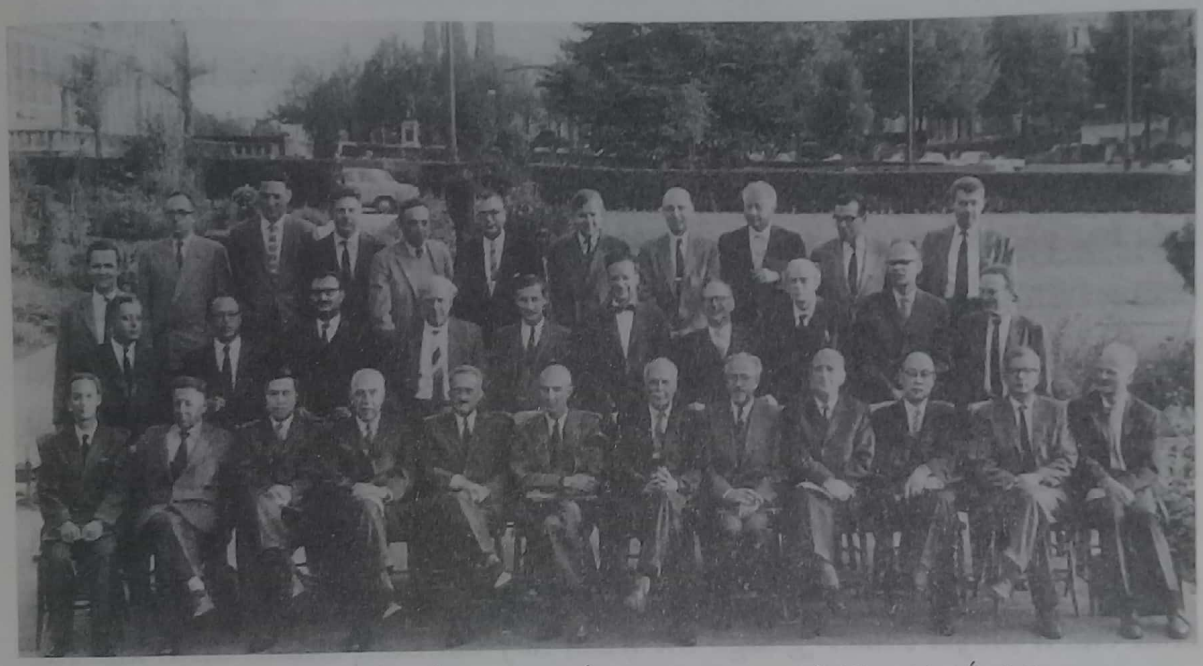
---

[85] Hoddeson et al., 21.

[86] Feynman 1963, 1-2.

Cuộc cách mạng của Mô hình Chuẩn có thể cho phép nói thêm: Mọi sự vật được làm bằng các hạt cơ bản có tên quark, lepton, và các hạt boson truyền lực cũng như quản lí chúng, cộng thêm một hạt Higgs mà sự tồn tại của nó rất là tự nhiên, hữu cơ, để tạo ra khối lượng cho các hạt cơ bản, và từ đó khối lượng của vật chất thấy được của toàn vũ trụ.

***



Hội nghị Solvay 1961 của nhiều thế hệ hai nửa thế kỉ 20. Từ trái sang phải, Hàng thứ nhất: S. Tomonaga, W. Heitler, Y. Nambu, N. Bohr, F. Perrin, R. Oppenheimer, Sir W. Bragg, C. Møller, C. Gorter, H. Yukawa, R. Peierls, H. Bethe. Hàng thứ hai: I. Prigorin, A. Pais, A. Salam, W. Heisenberg, F. Dyson, R. Feynman, L. Rosenfeld, P. Dirac, L. van Hove, O. Klein. Hàng thứ ba: A. Wightman, S. Mandelstam, G. Chew, M. Goldberger, G. Wick, M. Gell-Mann, G. Källen, E. Wigner, G. Wentzel, J. Schwinger, M. Cini (Nguồn: Schweber 2008, 311).